

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
ДО ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ  
З КУРСУ**

# **ВАКУМНА ТЕХНІКА**

*(для студентів 3 курсу денної і заочної форм навчання за напрямом  
підготовки 6.050701 “Електротехніка та електротехнології”  
спеціальності “Світлотехніка і джерела світла”)*

Методичні вказівки до проведення лабораторних робіт з курсу “Вакуумна техніка” ( для студентів 3 курсу денної і заочної форм навчання за напрямом підготовки 6.050701 “Електротехніка та електротехнології” спеціальності “Світлотехніка і джерела світла”) / Харк. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова; уклад.: Є. В. Шепілко. – Х.: ХНУМГ, 2013. – 42 с.

Укладач: к.фіз.-мат.н., доц. Є. В. Шепілко

Рецензент: к.фіз.-мат.н., доц. В. М. Ткаченко

Затверджено на засіданні кафедри світлотехніки і джерел світла,  
протокол № 6 від 02. 02. 2012 р.

## ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА І ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ.....	3
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1.....	6
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2.....	14
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3.....	22
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4.....	31
СПИСОК ДЖЕРЕЛ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО ВИВЧЕННЯ.....	38
ДОДАТОК 1.....	39
ДОДАТОК 2.....	40
ДОДАТОК 3.....	41

## ПЕРЕДМОВА І ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ

Сучасні технологічні процеси і розробка нових, більш передових, як у світлотехнічному виробництві, так і в інших галузях промисловості тісно пов'язані з вакуумною технікою. Сучасна експериментальна наука і розробка нових електронно-вакуумних приладів таких, як електронні лампи й напівпровідники для підсилення і генерації електромагнітних коливань в радіотехніці, радіомовленні, телебаченні, радіолокації, супутниковому зв'язку, телекеруванні космічними станціями й кораблями, а також розвиток ядерної фізики, фізики плазми, виробництва радіофізичного й напівпровідникового устаткування, створення нових матеріалів для потреб космосу, виробництво нових джерел світла неможливо уявити без упровадження сучасної вакуумної техніки вакуумних систем або вакуумних установок. Досягнення вакуумної техніки дозволили впровадити нові прогресивні технологічні процеси в металургії (вакуумне плавлення металів, вакуумне наплення матеріалів, вакуумне сушіння - випарювання, вакуумне просочення матеріалів і т. ін.), розробка вакуумних високо-амперних вимикачів, розвиток хімічної промисловості та сучасної фармації, біології немислимий без вакуумної техніки.

У зв'язку з цим потреба у спеціалістах, які мають глибокі знання з вакуумної техніки не зменшується.

Виконання лабораторних робіт з курсу "Вакуумна техніка" має сприяти більш глибокому засвоєнню теоретичного матеріалу і закріпленню знань, отриманих студентами на лекціях, а також сприяти розвитку навичок наукового дослідження.

Для успішного виконання лабораторної роботи кожен студент має перед виконанням роботи попередньо уважно вивчити теоретичний бік явища, на якому базується робота.

Неможливо сподіватись на успішне виконання роботи без твердих знань теорії та розуміння явищ і закономірностей, що лежать в основі роботи.

Важливим елементом наукового дослідження є старання підготовка до виконання лабораторної роботи.

Особливу увагу слід приділяти проведенню вимірів і оцінці впливових похибок як в експерименті, так і в розрахунках. Якщо отримані результати розбігаються з можливими, то слід привести величину їх похибки.

Графіки слід будувати у зручному для аналізу масштабі – лінійному, напівлогарифмічному чи логарифмічному, залежно від меж вимірів.

У методичних вказівках наведено опис лабораторних робіт, які дають уяву про техніку отримання й вимірювання вакууму. Наведено теоретичний матеріал, необхідний для яснішого розуміння й виконання практикуму, а також вказані необхідні завдання й порядок їх виконання. Для самостійного додаткового вивчення наведено список літературних джерел і контрольні запитання до кожної лабораторної роботи, а також наведено додаток з необхідними довідковими даними.

Приступати до виконання лабораторної роботи дозволяється тільки після отримання допуску від викладача.

У результаті виконання лабораторного практикуму студент має

**знати:**

а) типи, будову й принцип роботи насосів для створення середнього, високого й надвисокого вакууму;

б) будову й принцип роботи манометрів для вимірювання середнього, високого й надвисокого вакууму;

в) правила експлуатації вакуумних установок;

г) правила техніки безпеки при роботі з вакуумними установками;

**вміти:**

а) створювати й вимірювати середній, високий і надвисокий вакуум;

б) користуватися дозувальним пристроєм;

в) градуювати манометри вакуумної установки;

г) визначати місця можливої течії у вакуумній системі;

д) оцінювати допустиму течу;

е) виконувати розрахунок провідності елементів вакуумної системи;

є) розраховувати тривалість відкачки до відповідного вакууму.

Звіт про виконану роботу кожен студент подає викладачу індивідуально.

Студенти, які успішно захистили звіти з лабораторних робіт протягом семестру згідно з їх виконанням, отримують залік лабораторного практикуму без додаткової співбесіди з викладачем.

Можливий зразок написання звіту наведено в кінці опису лабораторної роботи № 1.

# ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

## БУДОВА ТА ПРИНЦИП РОБОТИ ОБЕРТОВИХ НАСОСІВ ДЛЯ ОТРИМАННЯ НИЗЬКОГО І СЕРЕДНЬОГО ВАКУУМУ

**Мета роботи** - вивчення будови і принципу роботи обертових насосів на прикладі пластинчато-роторного насосу ; вивчення порядку вмикання і вимикання пластинчато-роторного насосу

При виробництві джерел світла виникає необхідність створення вакууму в колбах, де протікає газовий розряд або де розміщене тіло розжарення. Необхідно щоб у цих об'ємах знаходилась тільки точно визначена частина суміші газів за тиском, який значно нижчий за атмосферний.

Відомо, що атмосфера – це оболонка з суміші газів, що оточують Землю. Цю суміш газів називають повітрям, яке на рівні моря створює тиск у 760 Торр, але в залежності від стану процесів, що протікають в атмосфері та від висоти місця, відносно рівня моря, тиск повітря може змінюватися.

Таким чином, потрібно виконувати відкачку газу з технологічних об'ємів від атмосферного тиску ( $\sim 760$  Торр ) до величини порядку  $10^{-7}$  Торр.

У такому широкому діапазоні тисків не можливо виконати відкачку тільки одним вакуумним насосом, а тому її виконують, у загальному, в декілька стадій, за роботи двох і більше різних насосів, причому різних не за кількістю, а за принципом створення вакууму.

Слово “вакуум” у перекладі з латинської мови означає пустоту, тобто те, що нічим не заповнене. У вакуумній же техніці вакуумом називають стан газу за тиском, нижче атмосферного і розрізняють, умовно, чотири якісних ступеня вакууму: низький, середній, високий і надвисокий.

Згідно з положеннями молекулярно-кінетичної теорії, газ – це сукупність великої кількості молекул (найменших частинок речовини), які рухаються хаотично з великими швидкостями і взаємодіють в результаті зіткнень між собою і стінками об'єму, в якому знаходяться. Тоді кількісно ступені вакууму можна характеризувати числом Кнудсена, яке дорівнює відношенню числа зіткнень молекул зі стінками посудини ( $N_{mc}$ ), в якій знаходиться газ, до числа зіткнень молекул між собою ( $N_{mm}$ ):

$$Kn = \frac{N_{mc}}{N_{mm}},$$

а також якісно ще за тиском, або за середньою довжиною вільного пробігу молекул.

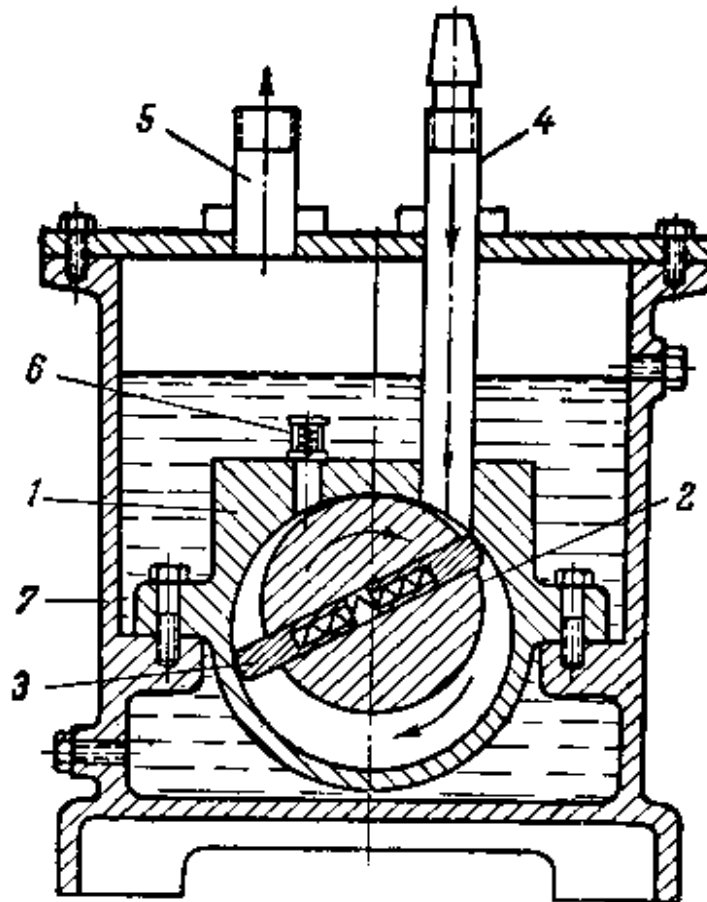
### Ступені вакууму:

– низький	– $Kn \ll 1$ ;	$760 > p > 1$	Торр;	$\lambda \leq 47$ мк,
– середній	– $Kn \sim 1$ ;	$1 > p > 10^{-3}$	Торр;	$47 \text{ мк} < \lambda \leq 50 \text{ мм}$ ,
– високий	– $Kn > 1$ ;	$10^{-3} > p > 10^{-7}$	Торр;	$50 \text{ мм} < \lambda \leq 0.5 \text{ км}$ ,
– надвисокий	– $Kn \gg 1$ ;	$p < 10^{-7}$	Торр;	$0.5 \text{ км} < \lambda \sim 50 \text{ км}$ .

Слід пам'ятати, що ці ступені розрізняють умовно. Так, стан газу, який знаходиться у порах твердого тіла, наприклад, у металі, відповідає високому вакууму навіть за атмосферного тиску газу, що оточує тіла, оскільки число Кнудсена у цьому випадку значно більше одиниці.

Високий вакуум створюють за відкачки в декілька стадій – перша стадія, яку ще називають попередньою, в загальному, закінчується коли тиск газу знижується до величини  $\sim 10^{-3}$  Торр, що відповідає середньому ступеню вакууму. Таке зниження тиску отримують за допомогою вакуумних насосів об'ємної дії, тобто насосів, які створюють розрідження на основі газового закону Бойля–Маріотта. До таких насосів відносять пластинчато-роторний, пластинчато-статорний, золотниковий та деякі інші насоси.

Розглянемо, як приклад, пластинчато-роторний насос, будова якого у розрізі, перпендикулярному осі статора, наведена на рис. 1.1.



*Рис. 1.1 – Пластинчато - роторний насос у поперечному розрізі:*

*1 - статор ; 2 - ротор ; 3 - пластини ; 4 - впускний патрубок ;  
5 - випускний патрубок ; 6 – випускний клапан ; 7 - бак з мастилом*

### **Будова й принцип роботи пластинчато - роторного насоса**

Насос складається з циліндричних: статора -1 (нерухома частина) і з меншим діаметром ротору - 2 (рухома частина), в якому розміщені на діаметрі по всій довжині рухливі пластини - 3. Ротор обертається за допомогою потужного електродвигуна, а пластини щільно притискуються до поверхні

статору за допомогою внутрішньої сталевієї пружини. Вісь ротора паралельна осі статора, але зміщена так, що ротор щільно торкається статора по твірній в одному місці. У статора є два отвори, через які газ потрапляє в його об'єм (впускний патрубок - 4) і навпаки, виштовхується з об'єму статора (випускний патрубок - 5). Випускний патрубок має клапан - 6 (відшліфовану кульку, що притискується сталевією пружиною). Зрозуміло, що отвори у статорі будуть відповідати наведеним назвам тільки за відповідного напрямку обертання ротора, тому цей напрям показують стрілкою на корпусі насоса або шківі.

Для зменшення тертя, яке виникає між щільно притиснутими рухливими деталями, вводять визначену кількість вакуумного мастила. З цієї причини в об'ємах відкачки буде присутня насичена пара вакуумного мастила, яка буде впливати таким чином на граничний тиск, створений насосом. Принцип роботи насоса зрозумілий з рис.2. За обертання ротора порція повітря переноситься від впускного об'єму (з впускним патрубком) до випускного об'єму (з випускним патрубком) й виштовхується до атмосфери за чотири стадії, а потім процес повторюється.

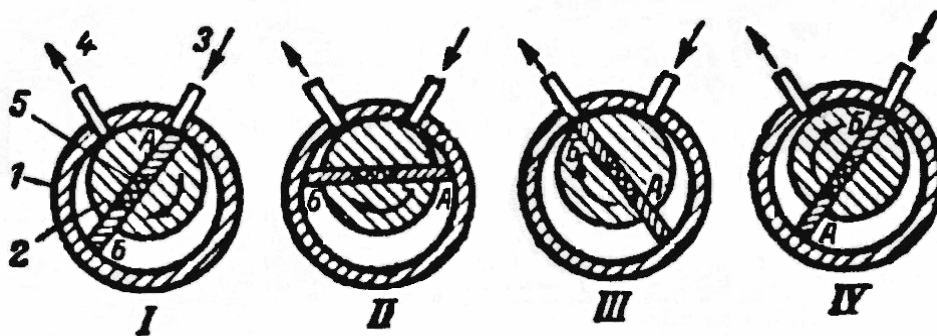


Рис. 1. 2 – Схема роботи пластинчато - роторного насоса:  
1- статор ; 2 - ротор ; 3 - впускний патрубок ; 4 – випускний патрубок ;  
5 - пружина ; А і Б - пластини ; I, II, III і IV - стадії роботи

### Головні параметри вакуумних насосів

Головними параметрами, які характеризують вакуумні насоси, є: **швидкодія насоса  $S_H$** , **граничний вакуум  $p_{ГР}$**  і **найбільший тиск**, який створює насос на **випускному** патрубку й при якому насос ще може здійснювати відкачку  $p_{max}$ . Найбільший тиск ще називають тиском запуску насоса. Для обертових насосів об'ємної дії граничний тиск (найменший тиск, створений насосом на **впускному** патрубку за тривалої відкачки) знаходиться в межах від  $5 \cdot 10^{-2}$  до  $10^{-3}$  Торр, а тиск запуску – декілька більший за атмосферний. Якщо тиск запуску більший за атмосферний, то не виникає необхідність приєднувати між випускним патрубком насоса і атмосферою додатковий вакуумний насос для збільшення тиску, оскільки відкачуваний газ буде вільно потрапляти до атмосфери. Швидкодія насоса  $S_H$  (**об'єм газу, що потрапляє до впускного простору, за одиницю часу за даним тиском  $p$** ;



$S_H = dV / dt|_p$ ) у робочому діапазоні тисків залежить від конструктивних розмірів насоса й швидкості обертання ротора і може бути  $\sim$  від 1 до 100 л/с. Слід зауважити, що швидкодія насоса залежить від тиску на впускному патрубку насоса і різко зменшується, коли тиск наближається до граничного. Оскільки у обертових насосів багато місць тертя, що за роботи насоса будуть нагріватися, то їх необхідно охолоджувати спеціальним вакуумним мастилом. Вакуумне мастило обертових насосів використовують як для охолодження працюючого насоса, так і для зменшення тертя й підтримання відповідної герметичності між об'ємами газів із різними тисками. З цих причин воно має задовольняти протилежним вимогам: 1) мати якомога менший тиск насиченої пари, 2) мати відповідну в'язкість.

Щоб у мастила був низький тиск насиченої пари, в ньому не має бути летких фракцій. За цієї причини використовують спеціально виготовлене вакуумне мастило, яке має тиск насиченої пари  $\sim 10^{-5}$  Торр, що цілком задовільно для обертових насосів. Але з часом роботи насоса воно не тільки забруднюється парою рідин, які можуть бути у відкачуваному об'ємі, але й змінює свій склад з причин місцевих перегрівів і в ньому з'являються леткі фракції (виникає крекінг). Тому необхідно у відповідні терміни замінювати відпрацьоване мастило свіжим, чистим і сухим.

В'язкість мастила впливає як на роботу насоса, так і на граничний тиск. Якщо вона буде дуже великою, то і герметичність буде надійною, але рух ротора буде утруднений і мастило буде перегріватись. Якщо в'язкість буде дуже малою, то вакуумне ущільнення буде не надійним. Відомо, що в'язкість мастила залежить від температури нагрівання, тому потрібно враховувати це при роботі насосів у літні й зимові часи, якщо від них залежить температура приміщення, де працюють насоси. Крім цього, від в'язкості ще залежить властивість мастил осмолюватись і накопичуватись (налипати) на стінках вакуумних об'ємів насоса, що утруднює роботу, навіть до повної зупинки. На швидкість осмолення дуже впливають відкачувані гази, такі як хлор, фтор або пара кислот, до складу яких входять ці елементи. Оскільки мастило ще потрібне для охолодження нагрітих частин насоса, то його має бути не менше відповідної кількості для даного насоса. При місцевому перегріві пара мастила може спалахнути. Чим нижче тиск насиченої пари мастила, тим більшою буде температура спалаху. Для вакуумних мастил обертових насосів температура спалаху має бути більшою  $200^{\circ}\text{C}$ . Для охолодження корпус насоса занурений у бак з рідким вакуумним мастилом, яке, таким чином, проникає і до внутрішніх деталей насоса.

Обертові насоси поряд з позитивними якостями мають ряд недоліків, які погіршують наведені характеристики. Граничний вакуум залежить від тиску насиченої пари вакуумного мастила, а також від конструктивних особливостей насоса (величини тиску пружини випускного клапана, шкідливого простору та інше). Для пониження граничного тиску обертові вакуумні насоси часто виготовляють двоступеневими. В одному монолітному корпусі (статорі) поєднують два однотипні насоси, що з'єднані послідовно, тобто випускний патрубок одного з насосів є конструктивно впускним патрубком іншого, в

якому випускний патрубок уже має випускний клапан і працює на атмосферу. Такі насоси мають покращений граничний вакуум, що досягає  $10^{-3}$  Торр. Змінення конструкції насоса (пластинчато-статорний) також дає можливість покращити граничний вакуум двоступеневих насосів до  $10^{-4}$  Торр.

### Вакуумна система та її елементи

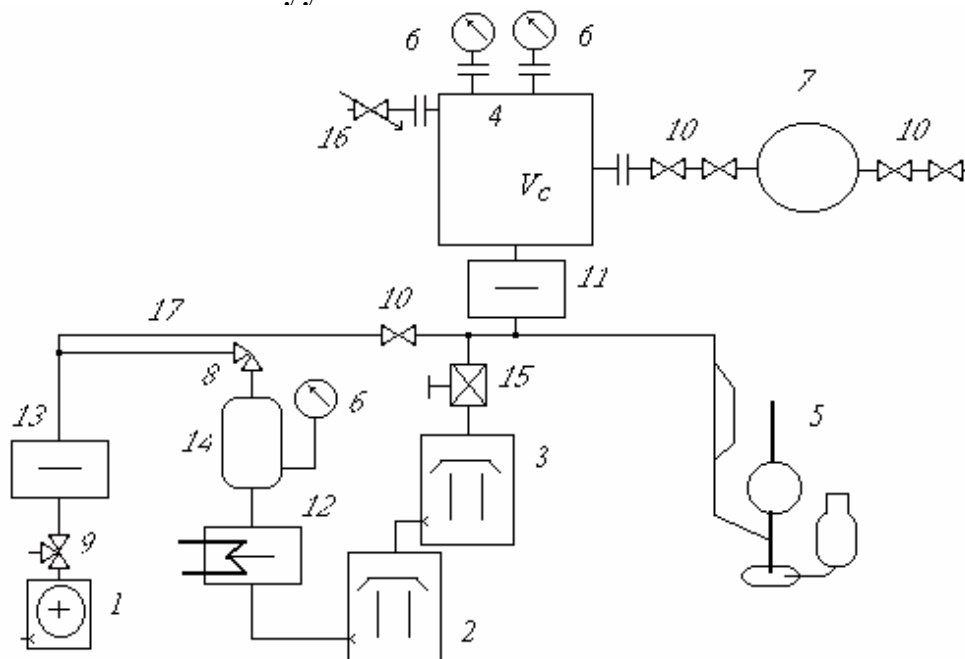


Рис. 1.3 – Принципова схема вакуумної системи

Вакуумні насоси приєднують до відкачуваних об'ємів (вакуумних камер) за допомогою вакуум-проводів (трубопроводів). Сукупність взаємно зв'язаних трубопроводів і різних приладів, що необхідні для відкачки газу чи пари, та для вимірювання тиску, називають вакуумною системою. Вона є головною частиною вакуумної установки, яка, крім вакуумної системи, складається ще з електродвигунів для насосів і пристроїв, що забезпечують роботу вимірювальних і інших елементів. Вакуумні установки, як і вакуумні системи, мають багато різновидів в залежності від забезпечення необхідного технологічного процесу.

Принципова схема однієї з вакуумних систем, як приклад позначення елементів системи, наведена на рис. 1.3 і складається: з вакуумних насосів попереднього вакууму 1, бустерного насоса 2 і насоса високого вакууму 3; відкачуваної камери 4; абсолютного манометра Мак-Леода 5; манометрів 6 (ЛТ-2 і ЛМ-2); дозувального пристрою 7; кутового крана 8; трипрохідного крана 9; прохідного крана 10; уловлювачів 11, 12 (пастки для пари вакуумних мастил); запобіжного балона (механічної пастки) 13; форвакуумного балона 14; клапана з ручним приводом 15; натікача 16; вакуум-проводів 17.

Форвакуумний балон використовують для зменшення загрози окислення робочої рідини високо-вакуумних насосів, якщо виникне раптове порушення роботи обертового насоса попереднього вакууму або при його тимчасовій зупинці, тимчасовому відключенні. Запобіжний балон використовують для уловлювання як пари робочої рідини високо-вакуумних насосів, так і різних

твердих частинок (металевої стружки), які можуть знаходитись у вакуумній системі (камері), щоб вони не потрапили в обертовий насос і не порушили його роботу. Але кращим уловлювачем пари мастил є пастки, що конструктивно спеціально призначені для цього.

Для наповнення, за необхідності, вакуумної системи визначеною кількістю того, чи іншого технологічного газу, що звичайно знаходиться в спеціальних балонах за високим тиском, використовують дозувальний пристрій 7, або натікач газів 16, до яких приєднують балон з необхідним газом. Для вимірювання тиску в різних місцях системи використовують різні манометри, які приєднують в необхідних місцях герметично.

### Правила експлуатації обертових насосів

#### 1. Порядок вмикання (запуску) обертового насоса.

##### 1.1. Приєднання до електричної мережі й вмикання насоса.

При першому приєднанні обвиток електродвигуна насоса до електричної мережі живлення необхідно спочатку зняти пас повідні і переконатись у правильності напрямку обертання ротора електродвигуна – має збігатись з напрямом стрілки на шківі насоса. Якщо не збігається, то необхідно змінити порядок підключення обвиток електродвигуна.

1.2. При наступних вмиканнях насоса рекомендовано спочатку рукою обернути барабан насоса на один - два оберти і тільки потім подати живлення на електродвигун, вмиканням пускового рубильника.

1.3. Щоб вакуумна система, яка може бути вже відкачаною до високого вакууму, не призводила негативну дію на насос, необхідно перед початком відкачки (запуском насоса) від'єднати її від **впускного** патрубку насоса за допомогою відповідних кранів чи затискувачів, або прослідкувати, щоб так уже було. Якщо це не зробити, то високий вакуум (низький тиск), що може бути у вакуумній камері, порушить місця ущільнення в обертовому насосі й призведе до виникнення потоку вакуумного мастила з баку до робочих об'ємів насоса й до вакуумної системи. Це призведе до забруднення вакуумної системи і виходу з ладу обертового насоса. Вакуумну систему приєднують до впускного патрубку насоса і до атмосфери відповідними вакуум-проводами, металевими або гумовими, на яких мають бути розміщені відповідні крани чи затискувачі, що замінюють крани, а тому потрібно, щоб спочатку вони перекривали вакуум-провід (був закритий чи затиснутий вакуум-провід), що приєднує її до обертового насоса **перед запуском насоса**, та від'єднувати (знімати затискувач) тільки після того, коли насос уже ввімкнений і працює. При непрацюючому або вимкненому насосі на **впускному** патрубку завжди має бути атмосферний тиск. За цієї вимоги вакуумну систему приєднують до насоса за таким порядком:

1) переконатись, що вакуумна система є від'єднаною від впускного патрубку обертового насоса і від зовнішнього середовища, якщо не від'єднана, то від'єднати за допомогою кранів, чи затискувачів, розміщених на вакуум-проводах, що з'єднують її з впускним патрубком насоса і з зовнішнім середовищем, відповідно.

2) вакуум-провід від впускного патрубка за правилом вмикання насоса, з'єднаний з атмосферою, тому перед увімкненням необхідно від'єднати його від атмосфери відповідним краном чи затискувачем гумового трубопроводу;

3) **тільки переконавшись**, що впускний патрубок обертового насоса від'єднаний як від атмосфери, так і від вакуумної системи ввімкнути насос за допомогою рубильника, що розміщений на стенді;

4) щоб працюючий насос тепер виконував відкачку вакуумної системи, необхідно відкрити кран чи зняти відповідний затискувач на гумовому трубопроводі, що з'єднує систему з впускним патрубком насосу (**не переплутати!!** з краном, що з'єднує з атмосферою). Щоб не викликати початкового значного різкого перевантаження насоса потоком поступаючого повітря, слід зняти затискувач не зразу, а після декількох порційних напусків на протязі 1-2 хвилин, затискуючи і відкриваючи його перед остаточним зніманням.

Якщо протягом 2-3 хвилин після вмикання насоса вакуум помітно не зростає, насос необхідно, відповідно до порядку вимикання, зупинити і перевірити герметичність вакуумної системи.

## 2. Порядок вимикання (зупинки) працюючого насоса.

Якщо виникає необхідність вимкнути обертовий насос, то перед вимиканням його з електричної мережі обов'язково необхідно:

1) спочатку від'єднати впускний патрубок від вакуумної системи відповідним краном чи затискувачем. Це надасть можливість збереження вакууму в системі після зупинки насоса;

2) вимкнути рубильник (розмикач) електродвигуна насоса і **зразу ж** з'єднати впускний патрубок насоса з атмосферою, знявши відповідний затискувач і, таким чином, різницю тисків. Якщо виникне необхідність розгерметизувати вакуумну систему, тоді і її приєднують до атмосфери відповідним краном.

## З а в д а н н я

1. Ознайомитись з вакуумною установкою на вашому стенді.

2. Замалювати схему вакуумної установки на стенді, за яким Ви працюєте, використовуючи умовні позначення вакуумних елементів (див. додаток) та зробити необхідні вимірювання розмірів вакуум-проводів (внутрішнього діаметра, довжини).

3. Ознайомитись з призначенням деталей та вузлів установки.

4. Вивчити інструкцію по експлуатації (вмиканню і вимиканню) обертового насоса.

5. Увімкнути (**обов'язково за правилом вмикання**) обертовий насос і переконатись у відповідності напряму обертання шківів до напряму стрілки.

6. Вимкнути (**обов'язково за правилом вимикання**) обертовий насос.

## **Зразок звіту про виконання лабораторної роботи**

### **Звіт з лабораторної роботи 1 “ Будова та ... “**

10 квітня 20\_\_ р.

Робота виконана на стенді №

Наводять схему вакуумної системи: вказують завдання (по пунктам), що були виконані, необхідні формули, таблиці з даними вимірів, графіки залежностей у відповідності з завданнями і необхідні висновки. Підписують.

Виконавець \_\_\_\_\_

Викладач \_\_\_\_\_

Для отримання заліку, окрім звіту, потрібно відповісти на контрольні запитання.

#### **Контрольні запитання співбесіди для отримання допуску до виконання лабораторної роботи**

- 1.З яких елементів складається вакуумна установка?
- 2.Чим поєднують елементи, що складають вакуумну установку?
- 3.Якими конструктивними параметрами характеризують вакуум-провід?
- 4.Якими пристроями і як їх позначають, що перекривають вакуум-проводи?
- 5.Як позначають на вакуумній схемі манометри?
- 6.Який порядок вмикання (запуску) обертового насоса?
- 7.Який порядок вимикання (зупинки) обертового насоса?

#### **Контрольні запитання для заліку**

1. Що називають вакуумом і які ступені вакууму розрізняють ?
2. За якими параметрами можна розрізнити ступені вакууму ?
3. Які насоси використовують для отримання середнього вакууму ?
4. Яка будова і принцип роботи пластинчато - роторного насоса ?
5. Які ще насоси використовують для одержання середнього вакууму і чим вони відрізняються від пластинчато - роторного насоса ?
6. Назвіть головні характеристики обертових насосів, їх приблизні значення та від чого вони залежать ?
7. Призначення вакуумного мастила та вимоги до його характеристик ?
8. На основі яких законів побудовані обертові насоси та їх недоліки ?
9. Правила експлуатації обертових насосів.
10. Що називають вакуумною системою? Призначення її окремих вузлів та елементів ?
11. Поясніть принципову схему вакуумної системи, яку ви склали при виконанні роботи .

#### **Джерела для самостійного вивчення**

[1, § 58; 2, § 2.3; 4, п. 6.1, стр.62-68, 78-82; 8, Л 11, п. 11.2 – 11-4]

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

### ОТРИМАННЯ І ВИМІРЮВАННЯ СЕРЕДНЬОГО ВАКУУМУ

**Мета роботи** - отримання середнього вакууму, вивчення будови і принципу роботи манометричного перетворювача ЛТ - 2 (ПМТ) і манометра опору, отримання навичок вимірювання тиску за допомогою манометричної лампи ЛТ -2 і вакуумметра ВВТ - 1А.

#### Принцип роботи і будова манометра опору і термопарного манометричного перетворювача ЛТ - 2

Вимірювання тиску, який встановлюється за відкачки вакуумної системи можна здійснювати за допомогою манометричних перетворювачів, які працюють на основі різних принципів.

Манометричні перетворювачі ЛТ -2 і манометри опору називають тепловими манометрами і побудовані вони на основі залежності теплопровідності газу від тиску. Теплопровідність газу відносять до явища переносу тепла в газах.

За законом Фур'є (закон теплопровідності) потік тепла  $Q$  пропорційний градієнту температури:

$$Q = - \kappa \frac{dT}{dx} . \quad (2.1)$$

Коефіцієнт пропорційності  $\kappa$  називають коефіцієнтом теплопровідності в напрямі осі  $x$  (у даному випадку).

На основі молекулярно - кінетичної теорії газів:

$$\kappa = \frac{1}{3} \rho \cdot v_{kB} \cdot \lambda \cdot c_V , \quad (2.2)$$

де  $\rho$  - густина газу, яка дорівнює добутку маси газу на число молекул в одиниці об'єму ( $\rho = m_0 \cdot n$ ),  $v_{kB}$  - середня квадратична швидкість молекул,  $\lambda$  - середня довжина вільного пробігу молекул і  $c_V$  - питома теплоємність газу за постійного об'єму.

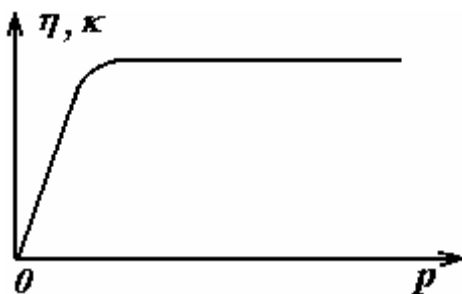


Рис. 2.1.

Оскільки  $\lambda \sim 1/p$ , а  $\rho \sim p$ , то можна зробити висновок, що теплопровідність газу не залежить від тиску. Але така залежність зберігається не завжди. Коли тиск знижується і число зіткнень молекул між собою стає меншим, ніж число зіткнень молекул зі стінками об'єму, в якому знаходиться газ, тоді коефіцієнт теплопровідності стає залежним від тиску. Дійсно, у цьому випадку перенос тепла

буде відбуватись більше за рахунок зіткнень молекул зі стінками і нагрітим тілом, тому середню довжину вільного пробігу молекул (вона має бути більшою за характерний розмір об'єму) можна прийняти за постійну величину у відповідному діапазоні тисків.

З експерименту відомо, що коефіцієнт в'язкості газу  $\eta$  залежить від тиску так, як зображено на рис. 2.1, тобто зменшується тільки у відповідному

діапазоні низьких тисків, що відповідає за визначеними розмірами об'єму, де знаходиться газ, режиму молекулярної течії газу. Коефіцієнт теплопровідності  $\kappa$  виражають через коефіцієнт в'язкості як  $\kappa = \eta \cdot c_V$ , тому можна вважати, що у визначеному діапазоні й  $\kappa = \theta \cdot p$  ( $\theta = \text{Const}$ ), тобто пропорційний тиску.

У теплових манометричних перетворювачах використовують явище переносу тепла газом від розжареної протікаючим електричним струмом тонкої платинової нитки до холодних стінок трубки (колби), в якій розміщена нитка.

### Манометр опору

Манометр опору складається з двох частин: вимірювальної (блок з приладами) та частини, яка взаємодіє з газом і приєднується до вимірювальної за допомогою кабелю. Останню ще називають датчиком тиску або манометричним перетворювачем.

Манометричний перетворювач має просту будову – це циліндрична скляна трубка, яка відкритим кінцем приєднується до вакуумної системи там, де потрібно вимірювати тиск, а закритим кінцем, через спеціальний цоколь, приєднується до вимірювальної частини. У цоколь вмонтовані два електроди, до яких приварена платинова нитка, що служить електричним опором (див. рис.2.2).

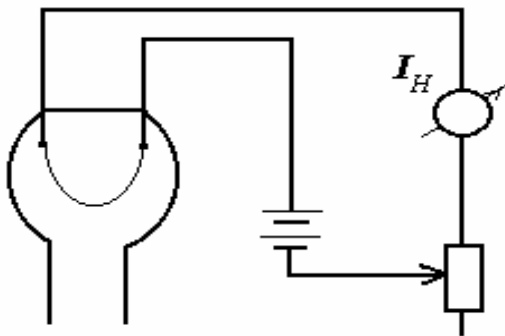


Рис. 2.2.

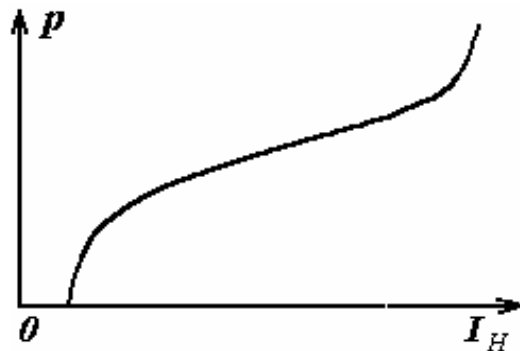


Рис. 2.3.

Електрична потужність ( $I_H^2 \cdot R$ ), яку підводять, щоб розжарити платинову нитку, витрачається не тільки на розжарення самої нитки, а й на нагрівання від тепла нитки електродів ( $P_3$ ), до яких вона приєднана, на випромінювання тепла, у відповідності з законом Стефана - Больцмана ( $P_2$ ), та на нагрівання стінок трубки газом унаслідок теплопровідності газу ( $P_1$ ). Таким чином, рівняння балансу потужності буде мати такий вигляд :

$$I_H^2 \cdot R = P_1 + P_2 + P_3, \quad (2.3)$$

де  $I_H$  – величина струму, яким розжарюють нитку до температури, наприклад,  $T_1$ ;  $R$  – величина електричного опору нитки за цієї температури (слід пам'ятати, що електричний опір металів змінюється в залежності від температури як  $R_t = R_0(1 + \alpha t^\circ)$ , де  $R_0$  – опір при  $0^\circ \text{C}$ ,  $\alpha$  – температурний коефіцієнт опору,  $t^\circ$  – температура за Цельсієм);  $P_1 = k_1(T_1 - T_2) \cdot p$ ;

$$P_2 = k_2 (T_1^4 - T_2^4); P_3 = k_3 (T_1 - T_3); k_1, k_2, k_3 - \text{відповідні множники}$$

пропорційності, а  $T_2$  – температура стінок трубки і  $T_3$  – температура кінців електродів, до яких приєднана нитка, оскільки електроди виходять назовні, а тому будуть мати меншу температуру, а ніж сама нитка.

Величини потужностей  $P_2$  і  $P_3$  не залежать від тиску газу, коли тиск є більшим ніж  $10^{-3}$  Торр і, якщо їх зробити значно меншими за  $P_1$ , то ними можна буде знехтувати.

Для того, щоб потужність  $P_3$  була відносно малою, достатньо вибрати тонку нитку з металу, що має відносно малий коефіцієнт теплопровідності (наприклад, платина), а від величини потужності  $P_2$  залежить чутливість манометра за різних тисків. Для підвищення чутливості манометра до зміни температури нитки завдяки дії теплопровідності газу, необхідно щоб потужність  $P_1$  була якомога більшою за радіаційну потужність  $P_2$ . Щоб манометр опору мав високу чутливість при вимірюванні низьких тисків, необхідно розжарювати нитку до відносно низької температури. У цьому випадку теплопровідність газу стає дуже малою, а за низької температури розжарення нитки очевидно, що випромінювана потужність  $P_2$  теж зменшиться.

Навпаки, за більших тисків вимірювання вигідно виконувати за вищої температури розжарення нитки, тобто за більшої величини струму  $I_H$ , оскільки більша кількість газу буде більше охолоджувати нитку.

Таким чином, величина вимірюваного тиску і чутливість манометричного перетворювача залежать від величини струму  $I_H$  і температури розжарення нитки  $T_1$ .

Вимірювання тиску за допомогою манометра опору виконують таким чином:

1) за якомога низького тиску в лампі ( $\sim 10^{-5}$  Торр) встановлюють робочий струм  $I_0$ , якому відповідає температура нагріву нитки  $T_1$ ;

2) газ, що напускають у лампу, буде охолоджувати нитку, тому її електричний опір зменшиться, що призведе до зростання струму  $I_H$ , який і вимірюють. Чим меншим буде тиск газу в колбі манометричного перетворювача, тим менше буде охолоджуватися платинова нитка, тим більшою буде її температура, а відповідно й опір, отже тим меншим буде вимірюваний струм.

Оскільки тиск вимірюється не безпосередньо, а опосередковано, тобто через струм, то його визначають за допомогою градуовальної кривої, що має вигляд, як на рис. 2.3, тобто кривої залежності тиску від струму манометричного перетворювача. При цьому, щоб знати точку відліку, спочатку встановлюють відповідний робочий струм.



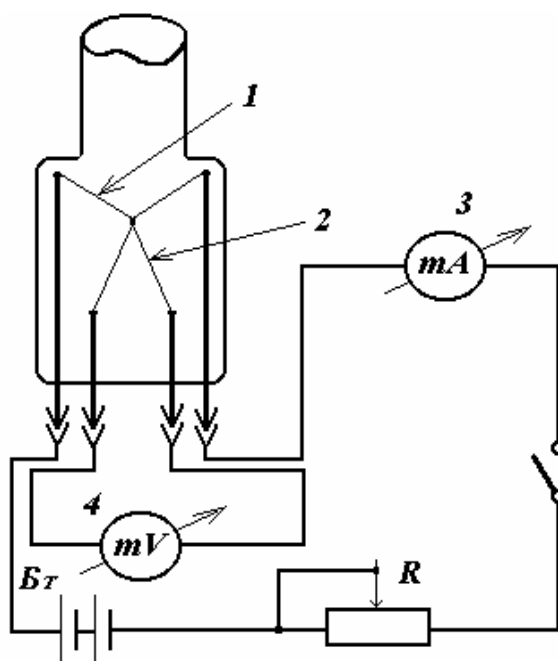


Рис. 2.4

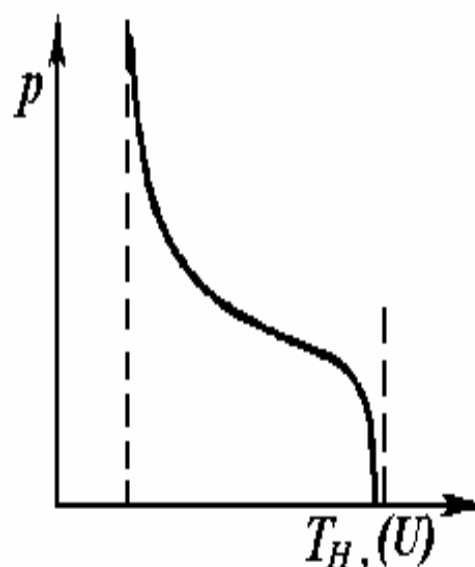


Рис. 2.5

### Термопарний манометричний перетворювач ЛТ - 2

Термопарний манометричний перетворювач ЛТ - 2 – це лампа зі скляним або металевим (ЛТ - 4) балоном, в який вмонтовано чотири електроди: до двох приєднана платинова нитка (дротик)  $I$  (див. рис. 2.4), як і у манометрі опору, і яку розжарюють необхідним електричним струмом  $I_p$  від батареї  $БТ$ . Величина струму  $I_p$  має бути сталою протягом вимірювань, тому її контролюють міліамперметром  $3$ , а встановлюють реостатом  $R$ .

До середини платинової нитки приварена термопара  $2$ , вільні кінці якої приєднані до останніх двох електродів і до яких, через рознімач підключають мілівольтметр.

Термопара – це два дротики з різних металів, які з одного кінця з'єднані за допомогою зварювання у вигляді краплини. Якщо зварену краплину нагрівати до температури, наприклад,  $T_1$ , то на вільних кінцях, які охолоджують до  $T_0$ , з'явиться термопарна електрорушійна сила ( $T.E.P.C.$ ), величина якої залежить від різниці температур ( $T_1 - T_0$ ) – чим більша ця різниця, тим більшою буде  $T.E.P.C.$ . Ще збільшити цю  $T.E.P.C.$  можна вибором відповідної пари металів. У лампі, яку розглядають, використовують термопару з металів хромеля – сплав (90 % Ni + 10 % Cr) і копеля – сплав (56 % Cu + 44 % Ni).

Відкритим кінцем лампу приєднують герметично до вакуумної системи, де необхідно вимірювати тиск.

Поки тиск у вакуумній системі буде атмосферним, мілівольтметр буде показувати  $T.E.P.C.$ , що близько до нуля при струмі  $I_p$ , заданому для даної

лампи при її виготовленні. За достатнього зниження тиску мілівольтметр **4** почне показувати зростаючу *T.E.P.C.*, тому що теплопровідність газу зменшиться і це призведе до підвищення температури нитки, а отже звареної краплі, й появи різниці температур. Коли тиск знизиться настільки, що теплопровідність стане дуже малою, стрілка мілівольтметра зупиниться на граничній (максимальній) позначці показу величини *T.E.P.C.*, зазвичай *10 мВ*, якщо струм  $I_p$  буде виставлено вірно; у цей момент витрати тепла ниткою і термопарою будуть зумовлені практично тільки теплопровідністю самих дротиків і випромінюванням.

Термопарну манометричну лампу виготовляють у запаяному вигляді з **високим вакуумом** в середині ( $10^{-4}$  -  $10^{-5}$  Торр). Щоб вірно визначити робочий струм запаяної лампи необхідно дуже старанно підібрати величину  $I_p$  реостатом **R** так, щоб стрілка мілівольтметра незмінно встановилась на поділці *10 мВ*. Цей струм і є робочим для даної лампи і при ньому виконують усі вимірювання після приєднання лампи до вакуумної системи. Оскільки за допомогою термопарної лампи вимірюють фактично не тиск, а *T.E.P.C.*, то для визначення тиску використовують градуювальну криву - криву залежності величини *T.E.P.C.* від тиску. При цьому, щоб знати початок відліку, тобто точку незалежності *T.E.P.C.* від тиску, а це буде за високого вакууму, спочатку встановлюють відповідний для даної лампи робочий струм  $I_p$ .

Очевидно, що градуювальна крива термопарного манометричного перетворювача відрізняється від такої для манометра опору. Її вигляд зображено на рис. 2.5.

Тепловими манометричними перетворювачами можна проводити вимірювання за різних газів і пари; можна вести безперервні спостереження за зміною тиску у вакуумній системі; вони не складні для виготовлення. Усе це є їх позитивними якостями. Але вони мають і недоліки, головними з яких є: залежність кривих градуювання від виду газу і змінення робочого струму з часом. Останній недолік виникає тому, що забруднюється поверхня платинової нитки парою вакуумних масел і інше. У зв'язку з цим, при використанні теплових манометричних перетворювачів необхідно періодично перевіряти (визначати) робочий струм, відкачуючи для цього вакуумну систему до тиску  $10^{-4}$  -  $10^{-5}$  Торр, що відповідає високому вакууму.

**З а в д а н н я 1.** Визначити робочий струм запаяної термопарної лампи .

Для виконання цього завдання необхідно :

- 1) ознайомитись з вакуумметром **ВВТ -1А** або **ВТ - 2** ;
- 2) приєднати (з урахуванням розміщення направляючого цокольного ключа) кабель, що з'єднує вимірювальний блок вакуумметра з датчиком, до запаяної лампи ЛТ - 2 ;
- 3) перевести тумблер “ **Діапазон вимірювання** ” (якщо він є) у позицію  $2 \cdot 10^{-3} \div 10^{-3}$ , а реостат **R** “ **Регулювання струму розжарення** ” вивести до краю в напрямі проти годинникової стрілки ;
- 4) ввімкнути штепсельну вилку в мережу  $\sim 220$  в і перевести тумблери “ **Мережа** ” та “ **Нагрів термопари** ” за напрямом стрілки, що на корпусі ;
- 5) перевести тумблер “ **Струм розжарення – вимірювання** ” спочатку в положення “ **Струм розжарення** ” і ручкою “ **Регулювання струму розжарення** ” встановити стрілку приладу на позначку (наприклад,  $110\text{ mA}$ ) за шкалою вимірювання струму, а потім в позицію “ **Вимірювання** “. Стрілка приладу займе положення після цього, що показуватиме величину якоїсь *T.E.P.C.* за шкалою (*мВ*). Так перевіряють працездатність вакуумметра, але прилад ще не підготовлений до вимірювання.

Для підготовки приладу до вимірювання необхідно встановити величину струму розжарення не приблизно, а ту, яка є значенням робочого струму даного манометричного перетворювача. Таким чином, необхідно знати, або визначити робочий струм манометричного перетворювача, який використовують. Взагалі, спочатку беруть нову запаяну термопарну лампу, визначають її робочий струм, потім відрізають запаяну частину, вмонтовують лампу у вакуумну систему, знаючи її робочий струм і занотовують це значення для пам'яті.

Після перевірки працездатності вакуумметра визначають робочий струм запаяної лампи. Для цього:

- 6) залишаючи тумблер у позиції “**Вимірювання**”, ручкою “**Регулювання струму розжарення**” встановити стрілку приладу проти позначки  $10\text{ мВ}$ , яка є граничною на шкалі вимірювання *T.E.P.C.* Слід відмітити, що зробити це треба дуже старанно і так, щоб стрілка нерухомо знаходилась проти позначки  $10\text{ мВ}$ , а не змінювала своє положення з часом. Коли це буде досягнуто, тоді
- 7) перевести тумблер “**Струм розжарення – вимірювання**” в позицію “**Струм розжарення**” і визначити величину робочого струму, значення якого буде відповідати позначці на шкалі вимірювання струму, проти якої встановиться стрілка. Занести це значення до протоколу вимірювання.

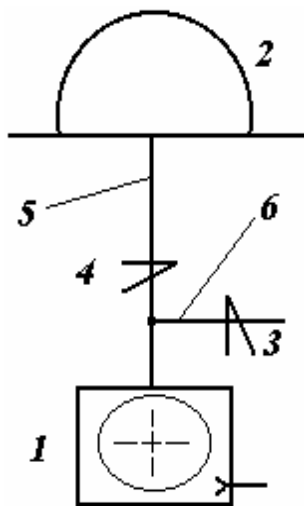


Рис. 2.6

**З а в д а н н я 2.** Отримання і вимірювання середнього вакууму:

1) замалювати принципову схему вакуумної системи, що знаходиться на стенді, де виконується робота, подібно до типової, як на рис. 2. 6;

2) вимкнути тумблер “ **Нагрів термопари** ” і обережно приєднати тепер кабель не до запаяної, а до лампи ЛТ - 2, що вмонтована у вакуумну систему і виставити її робочий струм, підготувавши вакуумметр до вимірювання ;

3) заповнити вакуумну систему атмосферним повітрям: для цього спочатку зняти затискувач **3** на гумовому трубопроводі **6**, що з’єднує впускний патрубок обертового насоса **1** з атмосферою; потім зняти затискувач **4** на гумовому трубопроводі **5**, що з’єднує вакуумну систему **2** з впускним патрубком обертового насоса; слід уважно це виконувати і тільки за такою послідовністю, щоб не призвести до прориву вакуумного мастила, що знаходиться в механічному насосі, у вакуумну систему – **порушення вказаної послідовності може вивести механічний насос з ладу і забруднити мастилом з насоса вакуумну систему**;

4) після заповнення вакуумної системи повітрям поставити затискувачі **4** і **3** знову в затиснуте положення на тих же трубопроводах ;

5) тільки після виконання попереднього пункту ввімкнути механічний насос, натиснувши на кнопку пуску або перевівши перемикач пуску насоса у верхнє положення і поступово, протягом 1 хв., порціями (то затискаючи, то відпускаючи) зняти остаточно затискувач **4** : затискувач **3** залишається у затиснутому положенні протягом усієї відкачки, тобто **тільки тоді, коли працює механічний насос**;

6) зняти залежність зміни тиску у вакуумній системі від часу відкачки: виміри слід проводити через кожні 1 - 3 хв. протягом 35 - 40 хв. з моменту пуску насоса і зняття затискувача **4** (вимірювання закінчують, якщо тиск більше не знижується протягом 3 хв.);

7) дані вимірювань занести до таблиці звіту з лабораторної роботи і за ними накреслити криву відкачки  $p = f(t)$ : значення тиску, що відповідають вимірам *Т.Е.Р.С.*, визначити за допомогою градуовальної кривої, що розміщена на стенді і для зручності по осі тиску використати логарифмічний масштаб (див. пояснення в Додатку);

8) після закінчення вимірювань поставити затискувач **4** знову в затиснуте положення і **тільки потім вимкнути обертовий насос 1** ;

9) зразу ж після вимикання насоса (пункт 8 ) зняти затискувач **3** , щоб насос не знаходився під дією вакууму, що є в трубопроводі до затискувачів **4** і **3**. **Затискувач 4 при цьому має залишатися в затиснутому положенні**;

10) за допомогою кривої відкачки визначити граничний тиск і занести визначене значення до звіту.

### **Контрольні запитання співбесіди для отримання допуску до виконання лабораторної роботи**

1. Який порядок запуску й зупинки обертового насоса?
2. Яким приладом вимірюють тиск в лабораторній роботі?
3. Як покази манометричного перетворювача переводять в одиниці тиску?
4. Яку залежність називають кривою відкачки?
5. Чому і як робочий струм термопарного манометра визначають в запаяній лампі?
6. Яку залежність необхідно визначити в лабораторній роботі?
7. В якому масштабі зручніше будувати визначену в роботі залежність?

### **Контрольні запитання для заліку**

1. Як побудований манометр опору і принцип його роботи ?
2. Як побудований термопарний манометр і принцип його роботи ?
3. Що представляє собою термопара і принцип її роботи ?
4. Порядок проведення вимірів за допомогою термопарного манометра ?
5. Що називають робочим струмом термопарного манометра ?
6. Якими міркуваннями необхідно керуватись при виборі діаметру трубки термопарного манометра ?
7. Якими способами можна визначити робочий струм термопарного манометра ?
8. Як визначають величину тиску газу, що знаходиться у вакуумній системі, за допомогою термопарного манометра ?
9. Чому необхідно періодично визначати (перевіряти ) значення робочого струму термопарного манометра ?
10. Наведіть межі вимірювання тиску за допомогою термопарного манометра ?
11. Чим обумовленні такі межі вимірювання тиску ?
12. Яким чином можна змінювати чутливість манометра опору і чому ?
13. Напишіть рівняння балансу потужності теплових манометричних перетворювачів і проаналізуйте його.
14. Наведіть позитивні й негативні якості теплових манометричних перетворювачів .
15. Поясніть вид кривої відкачки (за яким законом вона змінюється ?) .
16. Як визначають граничний тиск ?
17. Як перевіряють робочий струм термопарного манометра, якщо він змінився з часом ?

### **Джерела для самостійного вивчення**

[1, § 58; 2, § 2.3; 4, п. 6.1, стр.62-68, 78-85; 8, Л 11, п. 11.2 – 11-4]

### ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

#### БУДОВА І ПРИНЦИП РОБОТИ ВИСОКОВАКУУМНИХ ПАРОСТРУМИННИХ ТА ДИФУЗІЙНИХ НАСОСІВ. ВАКУУМНА УСТАНОВКА З МЕТАЛЕВИМ ДИФУЗІЙНИМ НАСОСОМ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ВИСОКОГО ВАКУУМУ

***Мета роботи** - вивчення будови і принципу роботи металевого дифузійного вакуумного насоса, вивчення будови вакуумної установки для отримання високого вакууму, правил її експлуатації і техніки безпечної роботи, отримання навичок пуску і зупинки як високо-вакуумного насоса, так і вакуумної установки*

**Обладнання**, з якого складається лабораторна установка: камера відкачки для проведення технологічних операцій; дифузійний насос ММ-40А; двоступінчастий пластинчасто–статорний насос ВМ-461М; ЛАТР для регулювання напруги живлення підігрівача; вентиль для відокремлення дифузійного насоса від камери відкачки.

**Зауваження !** Перед виконанням роботи необхідно повторити правила пуску, експлуатації й зупинки обертових насосів попереднього вакууму, а також інструкцію – порядок проведення вимірювання тиску термомпарним манометром (див. лаб. роб. № 1, 2).

#### **Будова і принцип роботи високо-вакуумних пароструминних та дифузійних насосів**

Робота обертових насосів для отримання попереднього(низького) вакууму базується на використанні закону Бойля–Маріотта. Граничний тиск таких насосів не менший  $1 \cdot 10^{-3}$  Торр. Причиною цього факту є наявність шкідливого простору та ущільнень між пластинами насосів. Якщо ж необхідно отримати вакуум з меншим тиском, то використовують вакуумні насоси, робота яких ґрунтується на інших фізичних явищах, таких як внутрішнє тертя (в'язкість) або дифузія газів. У відповідності з молекулярно–кінетичною теорією ці явища обумовлені передачею імпульсу від молекул, що знаходяться в більш рухливому шарі струменя, молекулам шару, який рухається повільніше, а тепловий рух приводить до змішування молекул сусідніх шарів. Насоси, в яких використовують в'язкість газів, називають пароструминними, а при використанні дифузії – дифузійними. Головними елементами таких насосів є: 1) сопло; 2) робоча рідина; 3) нагрівач; 4) охолоджувач.

#### **Рівняння Бернуллі**

Якщо робочу речовину (рідина, чи її пара) переміщують по трубці зі змінним поперечним перерізом (див. рис.3.1), то виникає різниця тисків, яку можна визначити за рівнянням Бернуллі:

$$p_1 - p_2 = \frac{1}{2} \rho (u_2^2 - u_1^2), \quad (3.1)$$

де  $\rho$  – густина робочої речовини,  $u_1$  і  $u_2$  – швидкості в перерізі  $S_1, S_2$ , відповідно.

Як видно із залежності тиску уздовж трубки (рис.3.1), у місці звуження тиск понижений. Якщо приєднати до цього місця відкачувальну камеру, то газ, що знаходиться там, почне рухатися разом з рідиною в результаті захоплення струменем робочої речовини з причини внутрішнього тертя. Робочою речовиною може бути вода або її пара, або пара спеціальної вакуумної оливи.

### Водоструминні насоси

Насоси, в яких робочою рідиною є вода, називаються водоструминними (рис.3.2). Вода під тиском порядку атмосферного поступає до патрубку 1 і через звуження 2, яке називають соплом, виходить зі збільшеною швидкістю в напрямі до трубки 3, яка має розширення у вигляді лійки, що оточує сопло, щоб запобігти розбризкуванню. Струмінь води захоплює молекули газу з вакуумної камери за дії внутрішнього тертя (в зоні сопла створюється понижений тиск) і переносить їх на вихід з трубки 3 до атмосфери. Отже у вакуумній камері тиск буде поступово знижуватися. Водоструминні водяні насоси мають граничний тиск  $\sim 17$  Торр (тиск насиченої пари води за  $20^{\circ}\text{C}$ ). Це високий тиск, що відповідає низькому вакууму, але позитивною якістю таких насосів є велика швидкодія  $\sim 0,1$  л/с і проста конструкція. Водоструминні насоси широко використовують в лабораторних умовах у хімічних дослідженнях.

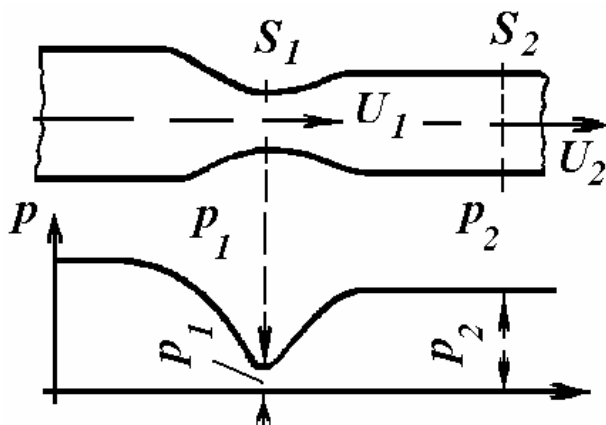


Рис. 3.1

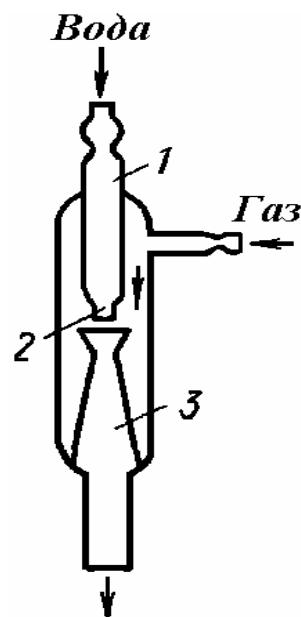


Рис. 3.2

### Ежекторні насоси

Для отримання більш високого вакууму і великої швидкодії використовують пароежекторні насоси. Одним з головних елементів цих насосів є ежектор. Ежектор – це пристрій, що створює потік газу з підвищеним тиском завдяки дії струменя робочої рідини або робочої пари, або іншого (робочого) газу, що виходять з надзвуковою швидкістю з сопла. Надзвуковий рух струменя

створює турбулентності, де відбувається змішування молекул струменя і газу, який відкачують. Ежектор складається з сопла 1, що розширюється по довжині, змішувальної камери 2 і дифузора 3 (див. рис.3.3). Струмінь пари, що виходить з надзвуковою швидкістю з сопла, потрапляє до змішувальної камери 2, де розширюється. Форму сопла вибирають таку, щоб пара, яка витікає з нього, мала швидкість більшу, ніж швидкість звука. На межі струменя виникає турбулентний шар, де молекули пари інтенсивно перемішуються з молекулами газу відкачувальної камери і отримують імпульс у напрямі руху струменя. Парогазова суміш з камери змішування 2 потрапляє до дифузора 3, що розширюється за довжиною, де швидкість потоку суміші зменшується, а тиск збільшується. Насос з ежектором має велику швидкодію (50–1000 л/с) у межах тиску  $10^{-1} - 10^{-2}$  Торр, тобто в діапазоні, де обертові пластинчаті насоси мають граничний тиск.

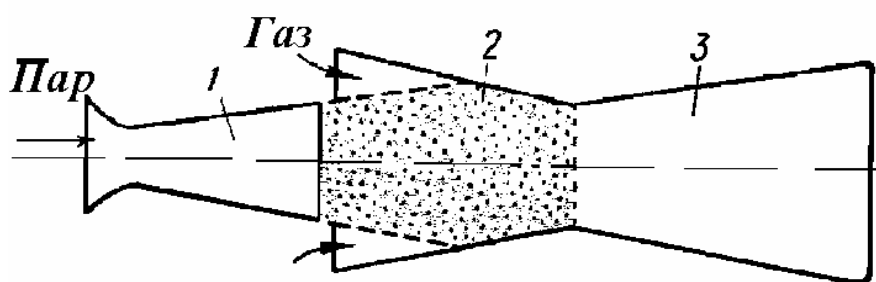


Рис. 3.3

У зв'язку з цим пароежекторні насоси розміщують між високо-вакуумним і насосом попереднього вакууму, а для отримання ще меншого тиску, їх роблять багатоступінчастими, тоді граничний тиск знижується до  $10^{-3} - 10^{-4}$  Торр. До недоліку слід віднести залежність швидкодії насоса від тиску газу.

### Дифузійні молекулярні насоси

У дифузійних молекулярних насосах зниження тиску виникає в результаті дифузії молекул газу, що знаходиться у вакуумній камері, з молекулами струменя пари робочої рідини. Отже, в дифузійному вакуумному насосі середня довжина вільного пробігу молекул пари має бути достатньою для швидкої дифузії. На рис. 3.4 наведена схема простого дифузійного молекулярного насоса Ленгмюра. Цей насос складається з двох циліндричних трубопроводів, розміщених коаксіально. Важливо, щоб величина проміжку між внутрішнім і зовнішнім циліндрами була за порядком як середня довжина вільного пробігу молекул пари на виході з внутрішнього циліндра. Зовнішній циліндр охоплений об'ємом, в якому примусово протікає вода для інтенсивного охолодження. Тому пара, що потрапила на внутрішню стінку зовнішнього циліндра буде конденсуватися раніше, ніж вона зможе піднятися до вакуумної камери *У*. У той же час молекули газу, що потрапили до зони струменя в результаті дифузії, напрямлятимуться до випускного отвору, де їх видаляють попереднім розрідженням.



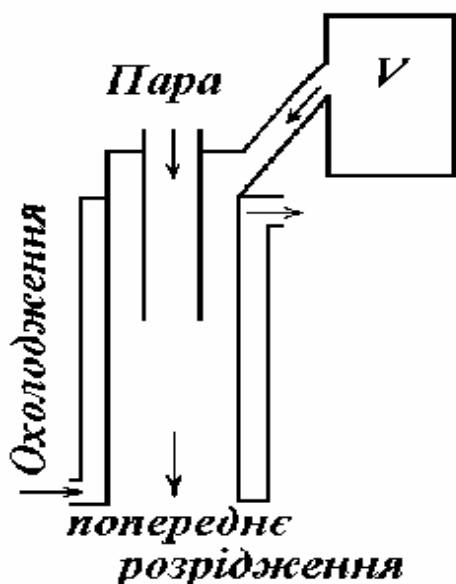


Рис.3.4

Після конденсації пари, захопленій з вакуумної камери, газ видаляють насосом попереднього розрідження.

Для створення струменя пари використовують нагрівач робочої рідини, а щоб не виникали витрати пари, застосовують холодильник, на стінках якого пара робочої рідини конденсується і стікає до резервуару. Молекули газу, захоплені струменем пари, скупчуються біля випускного патрубку. Таким чином біля випускного патрубку тиск газу, що відкачується, стає більшим ніж тиск у камері відкачки. Щоб не виникав зворотний рух молекул до камери, на випускному патрубку необхідно зробити тиск нижчий, ніж тиск скупчених молекул за допомогою насоса

попереднього вакууму. Отже, дифузійні насоси, як і пароструминні, не працюють без додаткових (обертових) насосів, причому за допомогою останніх треба створити тиск менший ніж тиск, що створюється дифузійним насосом, чи пароструминним на випускному патрубку, тобто граничний тиск обертових насосів обов'язково має бути нижчим за випускний тиск високовакуумного насоса.

Швидкодія дифузійного насоса не залежить від тиску газу, що вигідно відрізняє його від ежекторного. Типова залежність швидкодії дифузійного насоса від тиску наведена на рис. 3.5.

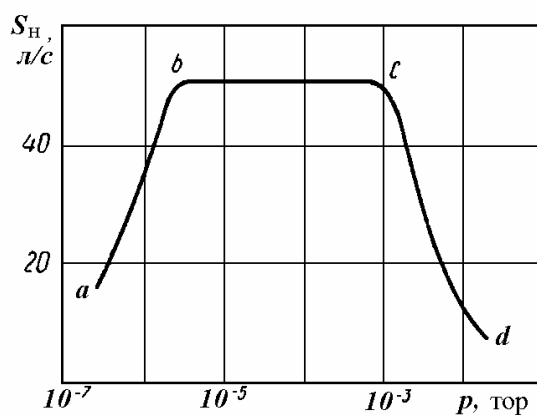


Рис. 3.5

Процес дифузії газу в струмінь пари не залежить від тиску на випускному патрубку, тому швидкодія насоса в широких межах залишається постійною. Зменшення швидкодії за низького тиску (відрізок *ab*) обумовлене головним чином зворотною дифузиею газу через струмінь пари, а за високого тиску (відрізок *cd*) – відривом струменя від стінок насоса, що супроводжується перетіканням газу від випускного патрубку до вакуумної камери.

### **Вимоги до робочої рідини пароструминних та дифузійних насосів**

До робочої рідини насосів ставлять такі вимоги: 1) мати якомога меншу пружність пари за кімнатної температури і якомога більшу – за температури кипіння; 2) бути стійкою до розкладання на фракції при нагріванні; 3) якомога менше розчиняти гази; 4) хімічно не реагувати з газами, що відкачуються і з молекулами конструктивних матеріалів насоса; 5) мати малу теплоту пароутворення для пониження витрат потужності на нагрівання. Вибрати рідину, яка б задовольняла всі ці вимоги, складно.

У вітчизняних високо-вакуумних насосах використовують три типи оливи: нафтового походження (вазелинові оливи ВМ-1, ВМ-2, ВМ-5); складні ефіри органічних кислот (октоїлі ОФ і ОС – ізооктилові ефіри фталевої і себацінової кислот) і силіконові (кремнійорганічні з'єднання марок ВКЖ-94А і ВКЖ-94Б).

**Вазелинові оливи** мають низьку пружність пари ( $10^{-8} - 10^{-9}$  Торр при  $20^{\circ}\text{C}$ ), але вони не стійкі до термоокислювальних процесів, а також неоднорідні за складом. Вони є сумішшю фракцій з різною молекулярною вагою і з цієї причини не мають визначеної точки кипіння. При перегріві олива розкладається і в робочій рідині з'являються легкі фракції, що призводить до збільшення граничного тиску насоса. При взаємодії з атмосферним повітрям гаряча олива окислюється і тому утворюється смолянистий наліт на внутрішніх деталях насоса, який важко видалити.

**Октоїлі** мають підвищену пружність пари ( $10^{-6} - 10^{-7}$  Торр при  $20^{\circ}\text{C}$ ) у порівнянні з вазелиновою оливою, але вони не є сумішшю різних фракцій. Недоліками октоїлів є низька термічна і окислювальна стійкість, а також нестійкість до взаємодії з вологою.

**Силіконові оливи** мають високу термоокислювальну стійкість і смолистих відкладень на внутрішніх поверхнях насосів при окисленні не утворюється. Вони стійкі при робочій температурі до взаємодії з атмосферним повітрям. Пружність пари вітчизняних силіконових олив досягає  $10^{-8}$  Торр при  $20^{\circ}\text{C}$ .

Загальним недоліком усіх вакуумних олив є розчинність газів, можливість розкладання і в зв'язку з цим – обмеженість терміну використання, непостійність параметрів у процесі роботи внаслідок неоднорідності складу.

### **Будова і принцип роботи металевого дифузійного насоса ММ-40А**

Дифузійний насос ММ-40А є двоступінчастим: його поздовжній розріз наведено на рис. 3.6. Конструктивно насос складається з трьох коаксіально розміщених металевих циліндричних паропроводів. Два внутрішніх циліндри з одного кінця мають сопло кожний, а другий кінець занурений в резервуар з робочою рідиною (вакуумною оливою). Зовнішній циліндр приєднують відкритим кінцем до відкачувальної камери, а частина його зовнішньої поверхні охоплена камерою водяного охолодження.

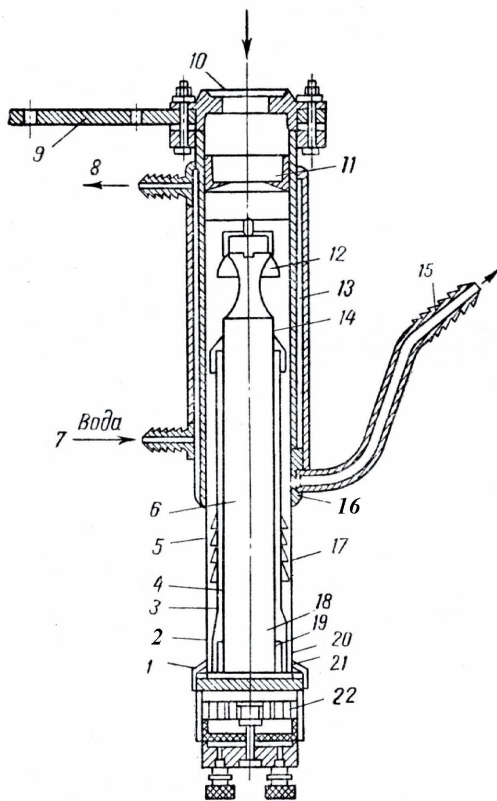


Рис. 3.6

Пара, що утворюється при нагріванні в резервуарі 1, який ще називають загальним випарником робочої рідини (вакуумної оливи), потрапляє до дифузійних сопел 12, 13 через самостійні канали. До верхнього сопла вона потрапляє через перший внутрішній циліндр-паропровід 6, тоді як до нижнього – через другий циліндр 3, до якого пара надходить через кільцеву щілину, що створена між ними в розширенні циліндра 3. Між корпусом насоса (зовнішній циліндр) 5 і другим циліндром створена камера 20 у вигляді вузької кільцевої щілини, куди стікає олива після конденсації на внутрішній поверхні охолоджувача 13. Насос охолоджують водою, яку підводять під тиском обов'язково до патрубку 7 і відводять через патрубок 8. Вода має бути чистою, щоб при експлуатації не засмічувати осадами охолоджувач, який є вузьким проміжком між корпусом насоса і водяною оболонкою. З

камери 20 олива перетікає через невеликі отвори до камери 21, а потім таким же чином до камери 19 і, нарешті, до центральної камери 18 загального для всіх камер випарника-резервуара 1. Камери 19, 21 відокремлені спеціальним розподільним циліндром 2 у вигляді стакана з невеликими отворами в нижній частині для перетікання оливи. За такої будови насоса виникає розгонка оливи при нагріванні, тобто відокремлення легких фракцій оливи, спочатку розрідження газу буде створюватись першим ступенем насоса під дією струменя пари легких фракцій оливи з сопла 14, а потім другим ступенем під дією струменя пари більш важких фракцій оливи з верхнього сопла 12. Такий насос може працювати з менш стійкою оливою і забезпечувати порівняно достатній граничний тиск. Щоб зменшити зворотній потік пари оливи, що нагрівається в камері 20, над нею встановлені манжети 17, і розміщені дещо нижче отвору 16 випускного патрубка 15. Для зменшення граничного тиску між впускним отвором насоса 10 і високо вакуумним соплом 12 розміщений дефлектор 11. Потік пари оливи, що потрапляє на поверхню дефлектора, віддзеркалюється, а також частково конденсується, це зменшує проникнення його до вакуумної системи. Нагрівання оливи виконують плоским нагрівачем-електроплиткою 22 з відкритою спіраллю. Центральна частина випарника, де скупчуються найбільше важкі фракції оливи, має нагріватися дещо більше, ніж інші частини. З цією метою у випарнику розміщують металеву шайбу, що має посередині виїмку. Розігрівается насос, тобто виходить на робочий режим через 20-25 хв. після підключення нагрівача. Спочатку роботи насоса може виникати інтенсивне газовиділення з оливи поглинутих газів, але через 20-40 хв. насос починає працювати на повну потужність. Щоб запобігти

газовиділенню, потрібно після вимикання нагрівача утримувати насос під вакуумом. Закріплюється насос спеціальною полицею 9.

### **Правила запуску і зупинки дифузійних насосів.**

#### **Правила безпеки при виконанні роботи**

Пароструминні й дифузійні насоси не можуть працювати без попереднього вакууму, тому потрібно дотримуватись таких правил запуску і зупинки:

1. Запустити обертовий насос попереднього вакууму відповідно до правил запуску пластинчатих обертових насосів (див. Лаб. робота. № 1).

2. Провести відкачку вакуумної системи до тиску, що дорівнює 0,08 Торр.

3. Приєднати електричну плитку до низу дифузійного насоса і закріпити її за гвинти легким повертанням.

4. Повернути ручки ЛАТРа, що розміщений на стенді, проти ходу годинникової стрілки в крайнє положення і приєднати шнур електричної плитки до розетки, що знаходиться біля ЛАТРа на стенді.

5. ЛАТРОм виставити напругу 110 В, за показаннями вольтметра.

**Свідченням живлення електроплитки буде протікання струму, що покаже стендовий амперметр.**

6. Після вмикання живлення електроплитки треба обережно поводитися біля насоса і не торкатися до відводів плитки, оскільки вони знаходяться під напругою.

7. Після закінчення вимірів необхідно зняти напругу живлення електроплитки за допомогою ЛАТРа так, щоб струм знизився до нуля.

8. Від'єднати шнур електричної плитки від розетки і через 2 хв. обережно, користуючись азбестовими ручками, щоб не обпектися, від'єднати плитку від насоса.

9. Роботу обертового насоса не припиняють до тих пір, поки тиск у вакуумній системі зросте до 0,01 Торр.

**З а в д а н н я 1.** Замалюйте схему вакуумного устаткування стенда, де виконується робота, з використанням відповідних конструктивних вимірів вакуум-проводів (довжини, діаметру отвора) і умовних позначень елементів.

**З а в д а н н я 2.** Вивчить призначення деталей і вузлів установки.

**З а в д а н н я 3.** Вивчить правила безпеки при роботі за стендом.

**З а в д а н н я 4.** Вивчить правила запуску і зупинки насосів, які використовують для отримання високого вакууму на стенді.

#### **З а в д а н н я 5:**

а) заповніть вакуумну систему атмосферним повітрям: для цього спочатку зняти затискувач на гумовому трубопроводі, що з'єднує впускний патрубок обертового насоса з атмосферою, потім зняти затискувач на гумовому трубопроводі, що з'єднує вакуумну систему з впускним патрубком обертового насоса; слід уважно це робити і тільки за такою послідовністю, щоб не призвести до прориву вакуумного мастила, що знаходиться в механічному насосі, у вакуумну систему. – **Порушення вказаної послідовності може вивести механічний насос з ладу і забруднити мастилом з насоса вакуумну систему;**

б) після заповнення вакуумної системи повітрям поставте обидва затискувачі знову в затиснуте положення на тих же трубопроводах.

**З а в д а н н я 6.** Після виконання попереднього пункту ввімкнути механічний насос, натиснувши на кнопку пуску або перевівши перемикач пуску насоса у верхнє положення, і поступово, протягом однієї хвилини, порціями (то натискаючи, то відпускаючи) зняти остаточно затискувач, що з'єднує вакуумну систему з впускним патрубком обертового насоса: другий затискувач залишається у затиснутому стані протягом усієї відкачки, тобто **тільки коли працює механічний насос.**

**Застереження !** Уважно перевірте положення затискувачів і повторіть порядок роботи з ними.

**З а в д а н н я 7.** Підготуйте термодіагностичний манометричний перетворювач до вимірювання і ввімкніть вакуумметр. Проведіть вимірювання зменшення тиску у вакуумній камері за допомогою термодіагностичного манометра через кожні дві хвилини. Для виконання цього завдання необхідно:

- 1) ознайомитись з вакуумметром **ВИТ -1А** або **ВТ-2**;
- 2) перевести тумблер “**Струм розжарення - вимірювання**” в положення “**Струм розжарення**” і виставити величину робочого струму термодіагностичної лампи, це значення занести до протоколу;
- 3) перевести тумблер “**Струм розжарення - вимірювання**” в положення “**Вимірювання**” і провести виміри. Значення тиску, що відповідають вимірам *Т.Е.Р.С.*, визначити за допомогою градуювальної кривої, що розміщена на стенді.

**З а в д а н н я 8.** Коли стрілка приладу термодіагностичного перетворювача дійде до позначки три мВ, запустить дифузійний насос, продовжуючи виміри тиску. Для запуску дифузійного насоса приєднайте до нього знизу нагрівач і закріпіть у щілинах незначним провертанням, а потім подайте напругу живлення за допомогою ЛАТРа (не більше 110 В).

**З а в д а н н я 9.** Вимірювання тиску продовжить, доки стрілка приладу дійде до позначки 10 мВ. Дані вимірювань занесіть до таблиці в звіті. Після закінчення вимірювань знизьте напругу нагрівача до нуля і вимкніть його, а потім від'єднайте від насоса. Обертовий насос залишається в працюючому стані до того часу, поки тиск у вакуумній камері збільшиться до 0,1 Торр, а робоча рідина охолоне до кімнатної температури.

**З а в д а н н я 10.** Поставте затискувач, що з'єднує вакуумну систему з впускним патрубком обертового насоса знову в затиснуте положення і **тільки потім вимкніть обертовий насос.** Після цього зніміть затискувач, що з'єднує впускний патрубок обертового насоса з атмосферою, щоб насос не знаходився під дією вакууму, що є в трубопроводі до затискувачів. **Перший затискувач при цьому має залишатися в затиснутому положенні.**

**З а в д а н н я 11.** Побудуйте криву відкачки - залежність тиску в камері від часу відкачки, використовуючи дані вимірювань; для зручності на осі тиску використайте логарифмічний масштаб (див. Додаток). Складіть звіт про виконання роботи. Зробіть порівняння з кривою відкачки, отриманою при виконанні л.р. № 2. Підготуйте відповіді на контрольні запитання.

**У звіті про виконання лабораторної роботи зазначте які завдання виконувались; наведіть схему вакуумної установки, таблиці результатів вимірювання; побудуйте необхідні графічні залежності; провести аналіз результатів і зробіть висновки.**

Для отримання заліку (окрім звіту) потрібно відповісти на контрольні запитання; відповіді можна привести в письмовому вигляді.

### **Контрольні запитання співбесіди для отримання допуску до виконання лабораторної роботи**

1. Яким приладом вимірюють тиск середнього вакууму і що необхідно попередньо знати, щоб виконати вимірювання?
2. Яким чином покази термодинамічного манометра переводять в тиск?
3. З яких елементів складається високо-вакуумна установка?
4. Чим можна здійснювати перекривання вакуум-проводів?
5. За яким порядком здійснюють запуск і зупинку обертового насоса середнього вакууму?
6. Яку залежність називають кривою відкачки?

### **Контрольні запитання для заліку**

1. Поясніть будову і принцип роботи водоструминного насоса.
2. Поясніть будову і принцип роботи пароструминного насоса.
3. Поясніть будову і принцип роботи дифузійного насоса.
4. Назвіть позитивні і негативні якості пароструминного і дифузійного насосів ?
5. Поясніть вид залежності швидкодії дифузійного насоса від тиску газу ?
6. Напишіть рівняння Бернуллі і поясніть його використання?
7. Назвіть головні елементи, з яких складаються пароструминні насоси?
8. Назвіть призначення цих головних елементів?
9. Як визначають величину тиску газу , що знаходиться у вакуумній системі, за допомогою термодинамічного манометру?
10. Що називають ежектором?
11. Поясніть будову, принцип роботи і призначення ежектора?
12. Наведіть значення головних характеристик дифузійного насоса ММ-40А?
13. Які вимоги ставлять до робочої рідини, на які параметри насоса ці вимоги впливають ?
14. Правила запуску і зупинки високо-вакуумної установки.
15. Поясніть вид кривої відкачки.

### **Джерела для самостійного вивчення**

[1, § 13; 2, § 5.3; 4, п. 7-3; 8, Л 12]

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

### ОТРИМАННЯ Й ВИМІРЮВАННЯ ВИСОКОГО ВАКУУМУ

**Мета роботи** - отримання високого вакууму; вивчення будови й принципу роботи іонізаційного манометричного перетворювача ПМІ-2; набуття навичок вимірювання низького тиску за допомогою манометричної лампи ПМІ-2 і вакуумметра ВІТ-1А

**Обладнання:** лабораторна вакуумна установка складається з таких елементів: камери відкачки для проведення високо-вакуумних технологічних операцій; дифузійного насоса ММ-40А або Н-1С; двоступінчастого пластинчасто-статорного насоса ВМ-461М; лабораторного автотрансформатора (ЛАТРа) для регулювання напруги живлення підігрівача; амперметра і вольтметра для контролю струму і напруги, що необхідно для роботи підігрівача; вентиля для відокремлення дифузійного насоса від камери відкачки; вакуумметра ВІТ-1А і манометричних ламп ЛТ-2, ПМІ-2 (ЛМ-2).

**Застереження!** Перед виконанням роботи слід уважно повторити послідовність дій, що необхідні для запуску, експлуатації і зупинки обертових насосів середнього вакууму (лаб. роб. № 1 і 2).

#### Будова й принцип роботи іонізаційного манометричного перетворювача ЛМ – 2 (ПМІ-2)

Високий вакуум характеризують за числом Кнудсена, яке є більшим за одиницю ( $Kn > 1$ ). Тобто високий вакуум – це стан газу, в якому середня довжина вільного пробігу молекул перевищує характерний лінійний розмір ємкості, де знаходиться газ. При високому вакуумі число зіткнень молекул між собою менше числа зіткнень молекул зі стінкою, що утримує газ. Взагалі, за таких умов тиск газу менше  $10^{-3}$  Торр. Для вимірювання такого низького тиску теплові манометри стають непридатними, а тому широко застосовують іонізаційні манометри, в яких використовують залежність інтенсивності іонізації молекул від тиску газу.

Із рівняння Больцмана відомо, що тиск газу прямо пропорційний концентрації його молекул за даної температури ( $p = nkT$ ). Оскільки при високому вакуумі концентрація молекул газу в мільйон разів менша за концентрацію при атмосферному тиску, то тиск газу можна визначити, якщо якимось чином “намітити” кожну молекулу, а потім їх “підрахувати”, тобто визначити концентрацію.

Якщо перетворити якимось чином кожну молекулу газу в іон, то електричний струм, який вони можуть створити, очевидно, буде пропорційним тиску. Для іонізації молекул застосовують лампу (перетворювач манометричний іонізаційний - ПМІ). Іонізацію молекул газу здійснюють потоком прискорених електронів, що створюються в лампі завдяки термоелектронній емісії (випромінювання електронів з нагрітих металів) з нитки розжарення.

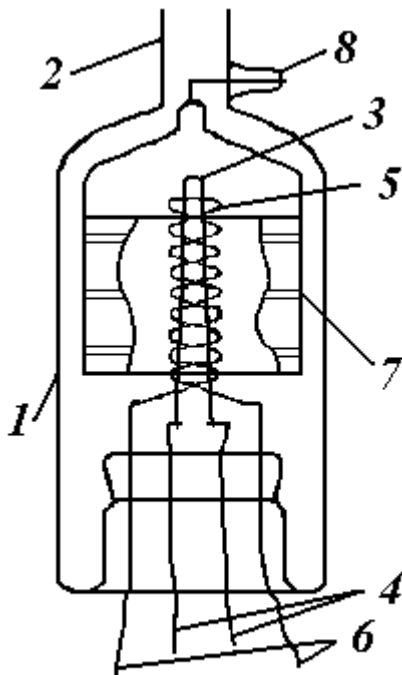


Рис. 4.1

Манометрична іонізаційна лампа-датчик ПМІ-2, як і термпарна лампа, складається з двох частин: вимірювальної і датчика. Датчик – це лампа (рис. 4.1) у вигляді скляної колби 1, що закінчується циліндричною трубкою 2 з одного боку, через яку вона приєднується до вакуумної системи, і цоколем з другого боку, в якому впаяні чотири електроди-вводи і через який лампа приєднується до вимірювального блоку вакуумметра ВІТ-1А. Цоколь лампи має спрямляючий ключ, щоб неможливо було переплутати електроди при з'єднанні лампи кабелем з вакуумметром.

До двох електродів 4 приварені кінці вольфрамової нитки розжарювання-катода 3, яка має форму петлі, розміщеної на осі колби, і підтримується від провисання пружиною, що закріплена на траверсі (утримувачі), (на рисунку не зображені). До інших двох електродів 6 приварені кінці біфілярної спіралі сітки-анода 5, яка співвісно оточує катод і підтримується від провисання іншою траверсою. Через ці два вводи сітку-анод можна розжарювати електричним струмом перед вимірюваннями, щоб викликати виділення поглинутих газів як з неї, так і, частково, з інших елементів лампи. Анод 5 і катод 3 оточені співвісно циліндричним колектором іонів 7, до якого приварений електричний ввід 8, розміщений на звуженні колби.

Лампу-датчик ПМІ-2 можна підключати за схемою, наведеною на рис. 4.2.

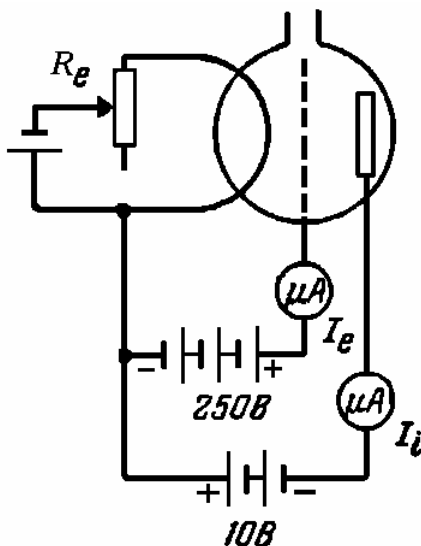


Рис. 4.2

Струм розжарювання катоду створюється джерелом постійної напруги, регулюється реостатом  $R_e$  і контролюється міліамперметром  $I_p$  (на схемі не зображений). До сітки-анода прикладена додатна напруга до 250 В відносно катода, а до колектора іонів прикладена від'ємна напруга відносно катода. При розжаренні катода електрони, що випромінюються завдяки термоелектронній емісії, прискорює електричне поле анода. При зіткненні з поверхнею витків сітки-анода вони створюють електронний струм  $I_e$ . Оскільки сітка має великий період намотування, то значна частина електронів, які прискорює поле анода, не зразу потрапить на її поверхню, а

пролетівши повз неї, опиниться в гальмуючому електричному полі колектора іонів і починає коливальних рух навколо сітки перед тим, як потрапить до неї. Збільшення довжини траєкторії руху електронів збільшує ймовірність ударної



іонізації молекул газу і значно підвищує чутливість манометра. З цією ж метою відстань між сіткою-анодом і колектором іонів роблять відносно великою. Частина прискорених електронів, що пролетить між витками сітки за напрямом до колектора, при зіткненні з молекулами газу, зможе іонізувати їх і, таким чином, у просторі між анодом і колектором іонів з'являться додатні заряди (іони), що потрапляють до колектора під дією його електричного поля і створять іонний струм  $I_i$ . Для його створення достатньо до колектора прикласти від'ємну напругу приблизно 10 В.

Як показує досвід, при достатньо низьких тисках (звичайно нижче  $10^{-3}$  Торр) відношення іонного струму до електронного  $I_i / I_e$  прямо пропорційне до тиску газу в манометричній лампі:

$$I_i / I_e = b \cdot p \quad (4.1)$$

Якщо електронний струм протягом вимірювання підтримувати на незмінній величині, то можна записати, що

$$I_i = I_e \cdot b \cdot p = c \cdot p, \quad (4.2)$$

де  $c = I_e \cdot b$  і яку називають сталою іонізаційного манометра, що є характерною для лампи відповідної конструкції.

### Інструкція для роботи з іонізаційною лампою ПМІ-2

Лампу ПМІ-2 не дозволяється вмикати, якщо в об'ємі відкачки попередньо не створено високий вакуум.

Лампа ПМІ-2 призначена для вимірювання тільки високого вакууму, тому її дозволено вмикати після попереднього створення у системі тиску  $10^{-3}$  Торр, тобто коли стрілка на вимірювальному приладі, що відноситься до термопарної лампи ЛТ-2, показує 10 мВ.

Увімкнення лампи ПМІ-2 виконують у такій послідовності:

1.Перевірити початкові положення тумблерів:

а) тумблер “УСТАНОВКА НУЛЯ” – повернутий ліворуч;

б) тумблер “ЕМІСІЯ” – у положенні “ВИМІРЮВАННЯ”;

в) ручка “РЕГУЛЮВАННЯ ЕМІСІЇ” – в крайньому положенні за напрямом проти руху стрілки годинника;

г) ручка множника шкали – у положенні  $10^{-4}$  ( $10^3$ );

д) тумблер “РОЗЖАРЮВАННЯ ЛМ-2” – вимкнений;

е) тумблер “ВИМІРЮВАННЯ-ПРОГРІВ” – у положенні “ПРОГРІВ”.

2.Установити нуль:

а) обертанням ручки “УСТАНОВКА НУЛЯ” поставити стрілку приладу на початок шкали;

б) тумблер “ЕМІСІЯ” – в положення “ЕМІСІЯ”.

3.Здійснити розжарення сітки (тобто почати вивільнення – очищення всіх внутрішніх деталей лампи від газів нагріванням до високої температури з одночасною відкачкою за допомогою вакуумних насосів):

а) тумблер, що знаходиться зверху праворуч на ВІТ-1А, поставити в положення **“ПРОГРІВ”**;

б) тумблер, що знаходиться знизу праворуч на ВІТ-1А, перевести в положення **“РОЗЖАРЮВАННЯ”**.

Прогрівання здійснювати протягом 10 хв.

4.Встановити сталу величину електронного струму (5 мА):

а) тумблер, що зверху праворуч, з **“ПРОГРІВ”** перевести в положення **“ВИМІРЮВАННЯ”**;

б) обертанням ручки **“РЕГУЛЮВАННЯ ЕМІСІЇ”** поставити стрілку на позначку 5 А, яка відповідає значенню сталої іонізаційного манометра.

5.Виконати калібрування вимірювального приладу:

а) ручку множника шкали перевести в положення **“КАЛІБРУВАННЯ”**;

б) тумблер **“ЕМІСІЯ ЛМ-2 – ВИМІРЮВАННЯ”**, що розміщений під вимірювальним приладом, – поставити на **“ВИМІРЮВАННЯ”** (якщо стрілка не встановлюється на кінець шкали, то за допомогою викрутки і шліцевого гвинта **“КАЛІБРУВАННЯ”** поставити її на позначку 10 приладу).

6.Виконати вимірювання:

а) тумблер **“УСТАНОВКА НУЛЯ”** перевести в положення **“ВИМІРЮВАННЯ”**;

б) ручку множника шкали поставити у таке положення, щоб стрілка вимірювального приладу не виходила за межі шкали.

**З а в д а н н я 1.** Отримайте високий вакуум в об’ємі відкачки.

Щоб виконати це завдання треба керуватися методичними вказівками до першої і другої лабораторних робіт: спочатку створіть у вакуумній системі попередній вакуум за допомогою вакуумного насоса попереднього вакууму і виміряйте тиск термодіагностичною лампою ЛТ-2. Для цього необхідно:

1) зарисувати у звіті схему вакуумної системи, що змонтована на даному стенді подібно до типової, як на рис. 1.3(див. лаб.роб. № 1);

2) ознайомитися з вакуумметром **ВІТ-1А** або **ВТ-2**, що розміщений на стенді;

3) вивчити інструкцію для роботи з іонізаційною лампою ПМІ-2;

4) переконавшись в тому, що вакуумметр знаходиться у вимкненому стані, потім приєднати, з урахуванням розміщення направляючого цокольного ключа, лампу ЛТ-2 до кабеля, що з’єднує її з вимірювальним блоком вакуумметра;

5) якщо є тумблер **“ДІАПАЗОН ВИМІРЮВАННЯ”**, то треба встановити діапазон  $2 \cdot 10^{-1} - 10^{-3}$ , а ручку **“РЕГУЛЮВАННЯ СТРУМУ РОЗЖАРЕННЯ”** вивести до краю в напрямі проти годинникової стрілки;

б) встромити штепсельну вилку в мережу ~220 В і перевести тумблери **“МЕРЕЖА”** і **“НАГРІВ ТЕРМОПАРИ”** за напрямом стрілки на корпусі;

7) перевести тумблер **“СТРУМ РОЗЖАРЕННЯ – ВИМІРЮВАННЯ”** спочатку в положення **“СТРУМ РОЗЖАРЕННЯ”** і ручкою **“РЕГУЛЮВАННЯ СТРУМУ РОЗЖАРЕННЯ”** встановити за шкалою вимірювання струму величину робочого струму розжарення (вказана на стенді), а потім перевести його в положення **“ВИМІРЮВАННЯ”**. Стрілка приладу

після цього займе положення, що за шкалою ( $mV$ ) відповідає величині якоїсь  $T.E.P.C.$  (термоелектрорушійної сили), тобто початковому тиску у вакуумній системі;

8) переконатися в тому, що затискувачі 8 на гумовому вакуумпроводі, що з'єднує **впускний** патрубок обертового насоса 1 з вакуумною системою та затискувач 9 на гумовому вакуумпроводі, що з'єднує **впускний** патрубок обертового насоса 1 з атмосферою (див. рис. 5, лаб.роб. № 2), знаходяться у затиснутому положенні, тобто перекривають гумовий вакуумпровід;

9) тільки після виконання п. 7 і 8 увімкнути обертовий насос натисканням кнопки пуску або переведенням перемикача пуску насоса у верхнє положення;

10) поступово, протягом однієї хвилини **затискувач 8** то відкривати, то закривати ( $\sim 10$  разів), а потім зняти його остаточно: звернути увагу, що затискувач 9 залишається у затиснутому положенні протягом усієї відкачки, тобто **завжди, коли працює обертовий насос**;

11) через 10 хв. після цього термопарною лампою ЛТ-2 виміряти тиск у вакуумній системі;

12) при досягненні в системі вакууму 0,01 Торр (стрілка приладу термопарного манометра займе положення 3 мВ), ввімкнути водяне охолодження.

Витрати води, що протікає через холодильник дифузійного насоса, встановити такими, щоб температура води на виході не перевищувала  $25^{\circ}\text{C}$ . Надто охолоджена вода зможе привести до зниження швидкості пароутворення оливи, а отже – до зменшення динамічного тиску в струмені пари.

Переконатися в тому, що система охолодження діє нормально, після цього підключити електронагрівач дифузійного насоса до мережі живлення та подати на нього за допомогою ЛАТРу напругу  $\sim 150$  В (за постійного контролю струму, що показує амперметр). Під час роботи дифузійного насоса необхідно весь час стежити за справністю охолодження. При порушенні постачання води з будь-яких причин насос необхідно негайно відключити, електронагрівач від'єднати від насоса, але обертовий насос при цьому має працювати.

Після виконання пункту 11 перейти до виконання другого завдання, а після виконання пункту 12 – до третього завдання.

**З а в д а н н я 2.** Виміряйте тиск у запаяній лампі ПМІ-2.

У запаяній лампі ПМІ-2 створено високий вакуум при її виготовленні, тому вимірювання тиску в такій лампі дозволяється виконувати будь-коли.

Для проведення вимірювання необхідно:

1) приєднати (з урахуванням розміщення направляючого цокольного ключа) лампу ПМІ-2 до кабеля, що з'єднує її з вимірювальним блоком вакуумметра;

2) провести всі дії, вказані в інструкції для роботи з лампою ПМІ-2.

Результати вимірювання занести до звіту.

**З а в д а н н я 3.** Проведіть вимірювання тиску за високого вакууму в об'ємі відкачки і отримайте залежність зміни тиску від тривалості відкачки.

До виконання третього завдання слід приступити тільки після виконання пункту 12 першого завдання. Знову провести за допомогою термопарної лампи ЛТ-2 вимірювання середнього вакуума. Тільки тоді, як у вакуумній системі тиск стане нижчим за  $10^{-3}$  Торр (стрілка вимірювального приладу термопарного манометра займе положення проти позначки 10 мВ), дозволяється починати вимірювання тиску високого вакуума.

Для проведення вимірювань тиску високого вакууму необхідно:

1) від'єднати запаяну лампу ПМІ-2 від з'єднувального кабеля і обережно приєднати до нього, з урахуванням розміщення направляючого цокольного ключа, лампу ПМІ-2, що вмонтована у вакуумну систему;

2) провести усі дії, вказані в інструкції для роботи з лампою ПМІ-2.

Покази тиску записувати через кожні 1-2 хв. на протязі 30 хв. Результати значень тиску від тривалості відкачки ( $t$ ) занести до таблиці. За результатами вимірювань побудувати графік залежності  $p = f(t)$ .

**З а в д а н н я 4.** Зупинка процесу відкачки. Вимикання насосів.

Зупинку процесу відкачки проводять у такій послідовності:

1) спочатку вимикають іонізаційний манометр ПМІ-2 і потім зупиняють роботу **парооливого** насоса, для чого вимикають електронагрівач та за допомогою асбестових ручок від'єднують його від насоса і розміщують на теплоізоляційній підставці;

2) охолодження нагрітої оливи в насосі водяне охолодження не вимикають, а в окремих випадках дозволяється додатково охолоджувати нижню частину корпусу насоса (після відокремлення електронагрівача) зануренням у відро з холодною водою;

3) після того, як температура оливи знизиться до 30-40 °С (стрілка приладу термопарного манометра займе положення проти позначки 3 мВ), вимкнути водяне охолодження і поставити **затискач 8 у затиснуте положення**, тобто від'єднати вакуумну систему від працюючого обертового насоса;

4) вимкнути обертовий насос;

5) після зупинки обертового насоса **затискач 9** відкрити, а потім знову затиснути, тобто вирівняти тиск у насосі до атмосферного.

Пункти 3-5 слід виконувати уважно і тільки за вказаною послідовністю, щоб не призвести до прориву вакуумного мастила, що знаходиться в механічному насосі, у вакуумну систему. **Порушення вказаної послідовності може вивести механічний насос з ладу і забруднити мастилом з насоса вакуумну систему.**

**У звіті про виконання лабораторної роботи зазначити, які завдання виконувались, привести схему вакуумної установки, таблиці результатів вимірювання, побудувати необхідні графічні залежності, провести аналіз результатів і зробити висновки.**

Для отримання заліку потрібно представити звіт, зробити висновки відповідно до отриманих результатів і відповісти на контрольні запитання.

**Контрольні запитання співбесіди для отримання допуску  
до виконання лабораторної роботи**

1. Який порядок запуску й зупинки обертового насоса?
2. Після якої вимоги можна запускати дифузійний насос?
3. Як запускають дифузійний насос (що виконують)?
4. Чим вимірюють тиск високого вакууму і за якої умови можна починати вимірювання високого вакууму?

**Контрольні запитання для заліку**

1. Який вакуум називають високим, критерії оцінки вакууму?
2. Які елементи вакуумної системи необхідні для отримання вакууму ( $10^{-5}$  -  $10^{-6}$  Тор)?
3. Принцип роботи високовакуумного дифузійного насоса?
4. Наведіть значення параметрів парооливного насоса ММ-40.
5. Як побудований іонізаційний манометр ПМІ-2 і принцип його роботи?
6. Що називають сталою іонізаційного манометра?
7. Недоліки іонізаційного манометра?
8. Порядок проведення вимірів за допомогою іонізаційного манометра?
9. Укажіть діапазон тиску, що вимірюється за допомогою іонізаційного манометра, а також причини, що його обмежують?

**Джерела для самостійного вивчення**

[1, § 4, 13, 22, 26; 2, § 2.5, 5.4; 4, п. 3-1, 3-5, 7-3; 8, Л 4, 12, 14, 15]

## СПИСОК ДЖЕРЕЛ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО ВИВЧЕННЯ

1. Глазков А.А., Милованова Р.А. Учебная лаборатория вакуумной техники. – М.: Атомиздат, 1971. – 279 с.
2. Ворончев Т.А., Соболев В.Д. Физические основы электровакуумной техники. -М.: Высшая школа , 1967. - 352 с.
3. Дэшман С. Научные основы вакуумной техники. – М.: Мир, 1964. – 715 с.
4. Королев Б.И. Основы вакуумной техники. -М.: Энергия, 1964. - 464 с.
5. Фролов Е.С., Русак Ф.А. и др. Вакуумные системы и их элементы. – М.: Машиностроение, 1968. – 192 с.
6. Розанов Л.Н. Вакуумная техника. - М.: Высшая школа , 1990. - 320 с.
7. Шепілко Є.В. Конспект лекцій з курсу “ Електротехнологічні установки та пристрої. Вакуумна техніка“. – Харків- ХНАМГ, 2005. –123 с.
8. Намитоков К.К., Шепилко Е.В. Методические указания к самостоятельной работе студентов по курсу ФОИС, часть 1. - Харьков: ХИИГХ, 1991. – 68 с.

## Додаток 1

### Фізичні константи

Стала Больцмана, $k$	$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град
Газова стала, $R$	$R = 8,31 \cdot 10^3$ Дж/(Кмоль · град)
Заряд електрона, $e$	$e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ К
Маса електрона, $m_e$	$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг
Маса протона, $m_p$	$m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг

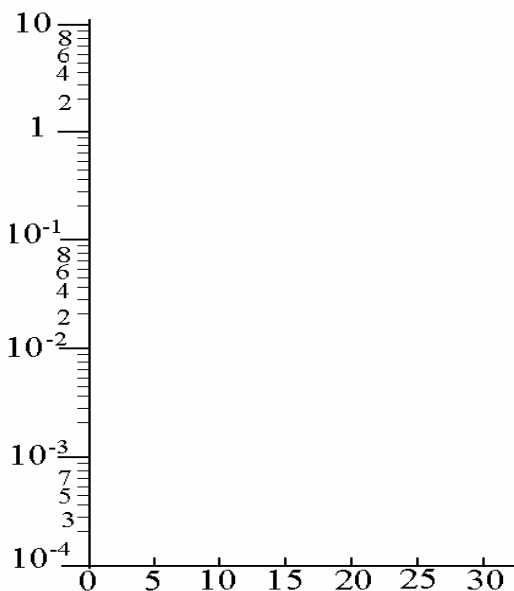
### Одиниці тиску та їх співвідношення

1 мм. рт. ст. = 1 тор	1 мм. рт. ст. = 133 Па
1 Па = $10^{-5}$ бар	1 Па = $7,50 \cdot 10^{-3}$ мм. рт. ст.
1 Па = $10^{-3}$ п'єза	1 Па = $9,87 \cdot 10^{-6}$ атм.

### Побудова логарифмічної шкали

Для побудови кривої відкачки треба охопити дуже широкий діапазон зміни тиску (від атмосферного – 760 Тор до, наприклад,  $\sim 10^{-4}$  Тор). Щоб це здійснити, слід використати для нанесення значень тиску логарифмічну шкалу.

Логарифмічну шкалу (зображена на рисунку, як приклад) будують таким чином: на вибраній осі від початкової точки  $1 \cdot 10^{-4}$  Тор, що буде початком шкали, відкладають шість однакових відрізків, наприклад, довжиною 30 мм. На



Рисунок

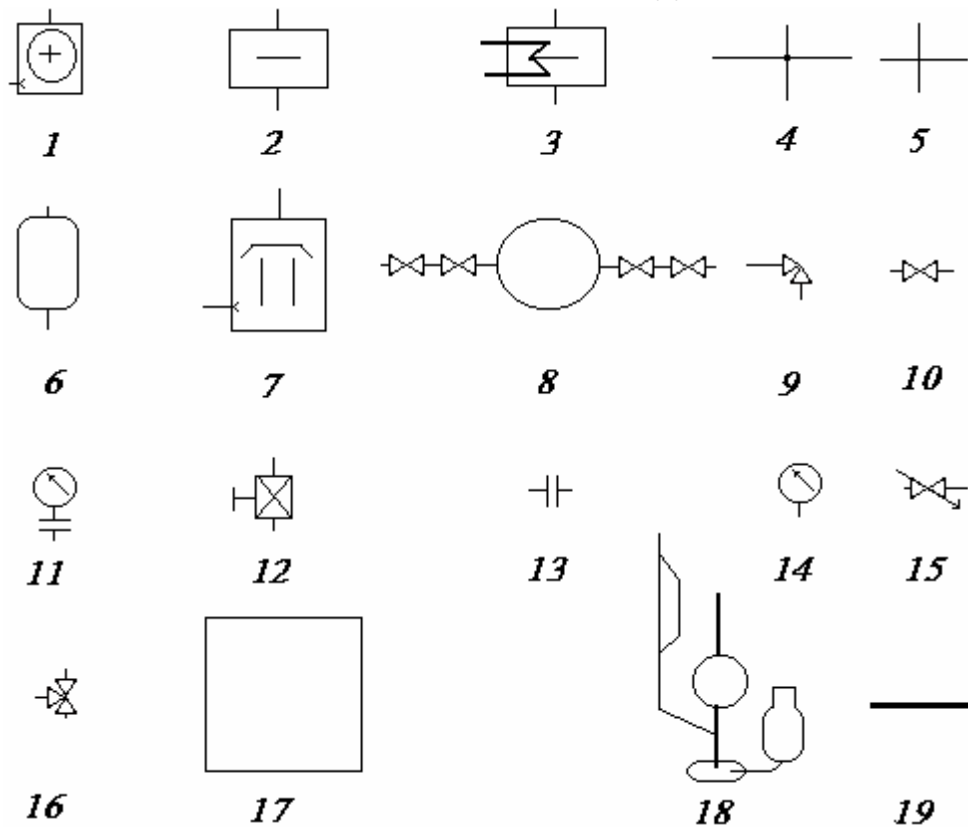
кожному відрізку тиск буде змінюватися на порядок. Потім на кожному відрізку наносять поділки, що дорівнюють добутку кожного десяткового логарифма ряду цілих чисел ( 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 ) на довжину відрізка за вибраним масштабом, наприклад, на 30 мм. Це будуть поділки, що відповідають 2, 3, 4 і т.д. для відповідного порядку.

Тобто, відмітки на частинах осі, наприклад, від 1 до 10, від 10 до 100 і т.д. будуть такими ж, як і на частині від  $1 \cdot 10^{-4}$  до  $1 \cdot 10^{-3}$  (див. рисунок), оскільки відповідні відрізки будуть однакові за довжиною.

Якщо необхідно нанести ще менші поділки між іншими поділками, наприклад, на відрізку між 1-ю і 2-ю поділками або між 3-ю і 4-ю, і т.п., то процедуру повторюють, але масштабом тепер буде довжина цього конкретного відрізка.

## Додаток 2

### Умовні позначення елементів вакуумної системи



- 1** - Вакуумний обертовий насос.
- 2** - Механічна пастка.
- 3** - Пастка, що охолоджується рідиною.
- 4** - З'єднання трубопроводів.
- 5** - Перехрещення трубопроводів.
- 6** - Форвакуумний балон.
- 7** - Пароструминний (дифузійний) насос.
- 8** - Дозувальний пристрій.
- 9** - Кран кутовий .
- 10** - Кран прохідний .
- 11** - Манометричний перетворювач з фланцем .
- 12** - Капан з ручним приводом .
- 13** - Фланець .
- 14** - Манометричний перетворювач (загальне позначення).
- 15** - Натікач .
- 16** - Кран трипрохідний .
- 17** - Камера вакуумна (загальне позначення).
- 18** - Компресійний манометр Мак - Леода .
- 19** - Трубопровід (загальне позначення).



**Додаток 3**  
**Головні характеристики насосів**

	<b>ВН-461М</b>	<b>ММ-40А</b>
Число ступенів	2	2
Середня швидкодія	0,78 л/с	40 л/с
Граничний тиск	$1 \cdot 10^{-3}$ Торр	$3 \cdot 10^{-6}$ Торр
Тип мастила, оливи	ВМ-4, ВМ-6	ВМ-1, ВМ-5
Кількість мастила, оливи	2,3 л	0,04 л
Робочий тиск	$760 \pm 1$ Торр	$5 \cdot 10^{-6} \div 2 \cdot 10^{-4}$ Торр
Найбільший тиск на випускному патрубку	770 Торр	$0,05 \div 0,1$ Торр
Число обертів ел. двигуна	540 за хв.	—
Потужність ел. двигуна	0,6 кВт	—
Потужність нагрівача	—	0,45 кВт
Необхідна швидкодія відкачки насоса попереднього тиску	—	0,2 л/с
Витрати води для охолодження	—	50 л/годину

**Характеристика вакуумметрів**

Вакуумметр іонізаційний термопарний	Тип перетворювача	Діапазон вимірювання Торр	Типовий робочий струм Лінійна шкала, 10 мВ
ВІТ-2	ПМТ-2	5...0,001	119 мА
	ПМТ-4		
	ПМІ-2	$0,02 \dots 1 \cdot 10^{-7}$	
ВІТ-3	МТ-8	30...0,002	Лінійна і логарифмічна
	ПМІ-10	$0,01 \dots 5 \cdot 10^{-8}$	шкала, 10 мВ

**Характеристика вакуумного мастила, оливи**

	<b>ВМ-1</b>	<b>ВМ-5</b>
Тип мастила, оливи	мінеральне	мінеральна
Тиск насиченої пари при 20° С	$3 \cdot 10^{-7}$ Торр	$1 \cdot 10^{-8}$ Торр
Граничний тиск насоса	$3 \cdot 10^{-4}$ Торр	$1 \cdot 10^{-6}$ Торр
Стійкість до окислення	низька	низька
Утворює смолистий наліт на внутрішніх деталях	так	так

*Навчальне видання*

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
ДО ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ  
З КУРСУ

**“ВАКУМНА ТЕХНІКА”**

*(для студентів 3 курсу денної і заочної форм навчання за  
напрямом підготовки 6.050701 “Електротехніка та електротехнології”  
спеціальності “Світлотехніка і джерела світла”)*

Укладач **ШЕПІЛКО Євген Володимирович**

Відповідальний за випуск к.т.н., доц. *С. Л. Бухарін*

Редактор *Д. Ф. Курильченко*

Комп’ютерне верстання *К. А. Алексанян*

План 2012, поз. 300 М

Підп. до друку 06.02.2012

Друк на різнографі

Зам. №

Формат 60x84/16.

Ум. друк. арк. 2,5

Тираж 50 пр.

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова,

вул. Революції, 12, Харків, 61002

Електронна адреса: [rectorat@kname.edu.ua](mailto:rectorat@kname.edu.ua)

Свідоцтво суб’єкта видавничої справи:

ДК № 4064 від 12.05.2011 р.